



TITLE:

# 電気アナログによる暗キヨ排水の 基礎的研究( Dissertation\_全文 )

AUTHOR(S):

高橋, 強

---

CITATION:

高橋, 強. 電気アナログによる暗キヨ排水の基礎的研究. 京都大学, 1971,  
農学博士

ISSUE DATE:

1971-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r1784>

RIGHT:

電気アナログによる

暗キヨ排水の基礎的研究

昭和45年

高橋 強

電気アナログによる

暗キヨ排水の基礎的研究

昭和45年

高橋 強

# 目 次

緒 言 .....	1
第 1 編 定常排水 .....	3
第 1 章 総 論 .....	5
第 2 章 Resistance Network について .....	13
I Resistance Network .....	13
1. Resistance Network の特徴 .....	13
2. Resistance Network の原理 .....	14
3. Resistance Network の製作 .....	16
4. 境界条件の設定 .....	19
5. 実験方法 .....	21
II 暗キヨ排水問題への応用 .....	23
1. 暗キヨ管壁における境界条件 .....	23
2. 均質土壌における暗キヨ排水の実験 .....	26
3. Network の精度に関する検討 .....	28
4. 地表面における浸透強度分布 .....	33
第 3 章 成層土壌における暗キヨ埋めもどし部の排水効果 .....	36
I 成層土壌における暗キヨ排水の実験 .....	36
1. 実験の目的および方法 .....	36
2. 実験結果 .....	38
3. 実験結果の検討 .....	44
II 暗キヨ埋めもどし部の排水効果 .....	45
1. 排水量算定の前提条件 .....	45
2. 暗キヨ埋めもどし部を考慮しない場合 .....	46

3. 暗キ $\Rightarrow$ 埋めもどし部を考慮した場合	47
■ 等角写像法による暗キ $\Rightarrow$ 排水量の算定	49
1. 暗キ $\Rightarrow$ 排水量の算定	49
2. 暗キ $\Rightarrow$ 間隔と不透層の深さを考慮した場合の検討	54
3. Resistance Network による実験	60
4. 計算図表	63
第 4 章 総 括	66
第 2 編 非定常排水	69
第 1 章 総 論	71
第 2 章 非定常排水と Resistance - Capacitance Network	75
I 非定常排水について	75
II Resistance - Capacitance Network について	77
1. R - C Network の特徴と原理	77
2. R - C Network の製作	79
3. 境界条件の設定	80
4. 実験方法	83
5. R - C Network の精度の検定	83
6. R - C Network の修正	86
第 3 章 非定常暗キ $\Rightarrow$ 排水の実験	90
I 均質土壌における非定常排水	90
1. 実験の目的および方法	90
2. 実験結果とその検討	91
II 成層土壌における非定常排水	99
1. 実験の目的および方法	99
2. 実験結果とその検討	100
第 4 章 非定常暗キ $\Rightarrow$ 排水理論に関する考察	105

第 5 章 總 括 .....	114
結 言 .....	116
參 考 文 獻 .....	117

農業の近代化のためには、大型農業機械を導入して労働の生産性を高めることが必要であるが、水田において農業機械の作業能率を向上させるためには、適切な排水を行なって地耐力の増強を図らなければならないことは広く知られているところである。

とくに大型機械の導入のために大区画水田が造成されつつある今日、ホ場排水の問題は農道の整備とともに重要視されるようになり、全国各地のホ場整備事業においても暗キヨ排水の必要性が指摘されている。

しかしながら、暗キヨ排水の計画実施にあたってはいろいろと問題点も多く、いまだ満足すべき設計方法が確立されているとはいえない現状である。

一般の水田においては均質土壌と考えられる場合はまれで、耕盤が発達し、成層状態をなしているのが普通であるが、このような水田に暗キヨ排水を計画する場合には、実際の土層条件に適合した合理的な設計を行なわなければならない。また、暗キヨ埋めもどし部においては粗な状態となっている場合が多く、排水に及ぼす影響が大きいことが指摘されているが、合理的な暗キヨ排水の設計のためにはその機構を明らかにすることが必要である。また、この暗キヨ埋めもどし部の効果を積極的に暗キヨ排水の改良に応用することも考えられる。

この研究は、以上のような観点から、暗キヨ排水の基礎的な問題について、とくに成層土壌中における暗キヨ排水の機構を明らかにするために、電気アナログの方法によって実験的に研究を行ない、検討と考察を加えたものである。

なお、この研究をすすめるにあたっては、京都大学農学部・富士岡義一教授に終始御懇切なる御指導をいただいた。ここに記して深謝の意を表する次第である。

# 第 1 編 定 常 排 水



## 第 1 章 総 論

暗キヨ排水に関する理論的な研究は、合理的な暗キヨ排水の設計のための基礎として重要な課題であり、従来から数多くの研究者によって研究が行なわれている。そのうち、定常状態における暗キヨ排水の問題に関しては、これまでもかなりの成果が得られているが、実際の暗キヨ排水の設計への応用という観点から検討してみると、いまだ一般的に適用しうるものは得られておらず、いろいろな問題点が残されているようである。以下に、従来の研究成果の概要とその問題点について述べることにする。

定常状態における暗キヨ排水の問題は、ある一定強度の降雨と平衡した地下水面をもって非タン水状態で排水が行なわれている場合と、土壤が地表面まで飽和してタン水状態となっている場合とに二大別して考えることができる。

非タン水状態の場合は、まず降雨と平衡した地下水面を考え、地表面に均等に降った降雨は地下水面まで鉛直に降下し、地下水面以下では Laplace 方程式に従うポテンシャル流となって暗キヨを通じて排水されると考えて解析が行なわれるのであるが、この場合にはまず第一に地下水面形を求めなければならない。しかしながら、このことは非常に困難であるので、多くの場合は実験的に、あるいはいろいろな仮定を用いて近似的解法によって決定しなければならない。

Childs<sup>1) 2) 3)</sup>は、浸透流と電流の相似性に基づいた電気アナログの方法によって一連の実験を行ない、暗キヨ排水に関する基礎的な特徴について研究を行なっている。

理論的に地下水面形を求める方法としては、まず Dupuit — Forchheimer の水平流の仮定を用いる方法があげられる。Aronovici and Donnan<sup>4)</sup>はこの方法によって簡単な暗キヨ間隔公式、いわゆる長円式を導いた。同様な解

析は Colding, Rothe, Kozeny, Hooghoudt らによっても行なわれている<sup>5)</sup> これらの長円式は形が非常に簡単であり、不透層が浅く、降雨強度が小さい場合にはかなり適用しうるものと考えられるが、しかし、暗キヨ周辺における流線の収束による影響を考慮していないために、一般的には妥当性に欠けているようである。

Hooghoudt は暗キヨ周辺の流線の収束による影響を考慮に入れて、暗キヨ近傍では流れは暗キヨに向い放射状流になると仮定し、暗キヨから離れた所では Dupuit - Forchheimer の仮定が成立つと考へて解析を行なった。<sup>5)6)7)</sup> そして、その結果に基づいて equivalent depth の概念を提唱した。これは暗キヨ近傍における流線の収束による影響を考慮して、暗キヨから不透層までの深さを修正したものであり、この equivalent depth を用いれば、つぎのような簡単な式によって暗キヨの深さ、間隔等を決定することができる。

$$S^2 = 4 \left( \frac{k_1}{q} \right) \cdot y^2 + 8 \left( \frac{k_2}{q} \right) \cdot d_e \cdot y \quad (1-1)$$

ここで、 $k_1$  は暗キヨより上の土壌の透水係数、 $k_2$  は暗キヨより下の土壌の透水係数、 $q$  は降雨強度であり、式中の他の記号は Fig. 1-1 に示すとおりである。また、 $d_e$  は equivalent depth で、不透層の深さ  $h$ 、暗キヨ間隔  $S$  および暗キヨ半径  $r$  の関数として求められる。その一例を示すと Fig. 1-2 のとおりである。

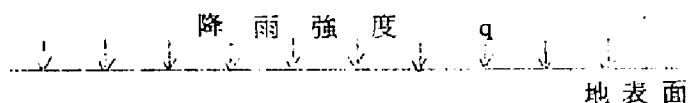
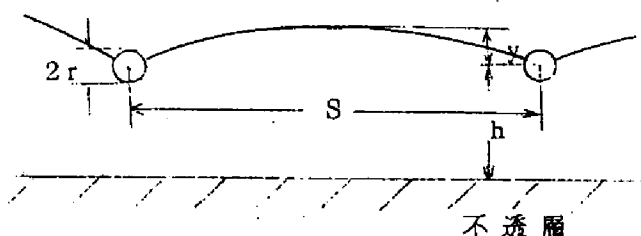


Fig. 1-1

暗キヨ間隔公式  
の記号図



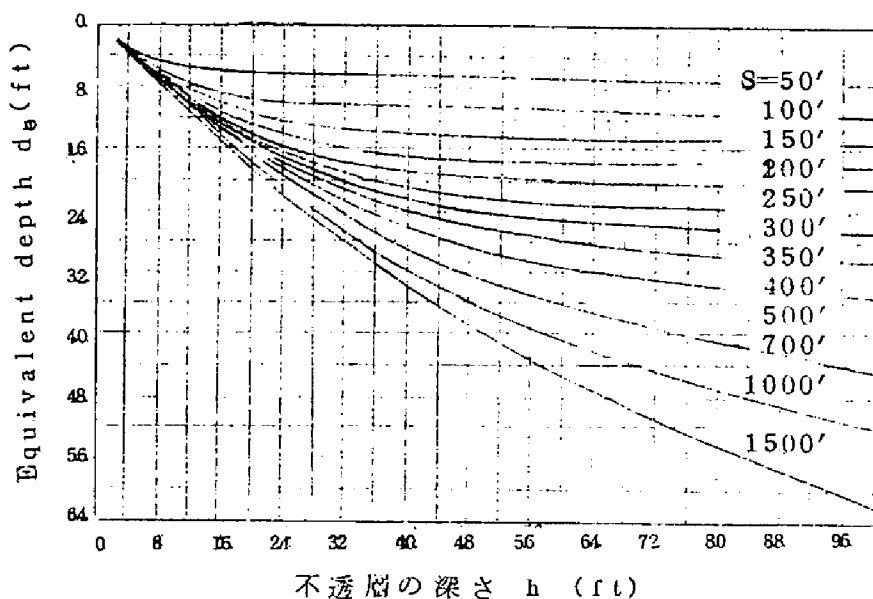


Fig.1-2 Equivalent depth の計算図表の一例

( $r = 0.7$  ft の場合)<sup>6)</sup>

以上は水平流の仮定を用いた近似解であるが、ポテンシャル理論からこの問題を取り扱ったものとしては、まず van Deemter のホドグラフ法による解析がある。<sup>7)</sup> また、Gustafsson および Engellund らによっても同様な解析が行なわれているが、<sup>5)</sup> これらは不透層が無限下方に存在する場合に対するものであり、またその結果も非常に複雑であるので、実用に適しているとはいえない。Visser は Ernst and Boumans による Laplace 方程式の数値解析 (relaxation) の結果をノモグラフに表わしている。<sup>5)</sup>

それに対して Kirkham<sup>8)</sup> は、暗キ  $\equiv$  より上の部分の流線を鉛直であると考え暗キ  $\equiv$  より下の領域に対しては Fourier 級数を使って Laplace 方程式を解き、地下水面形の理論式を導いた。また、その結果はかなり複雑になるので、計算に便利のように Fig.1-3 に示すようなノモグラフにして表わしている。

<sup>9)</sup> 図中の記号は Fig.1-1 に示されているとおりである。この Kirkham の理論は、その仮定から考えて、地下水面形の上限を表わすものと考えられ、

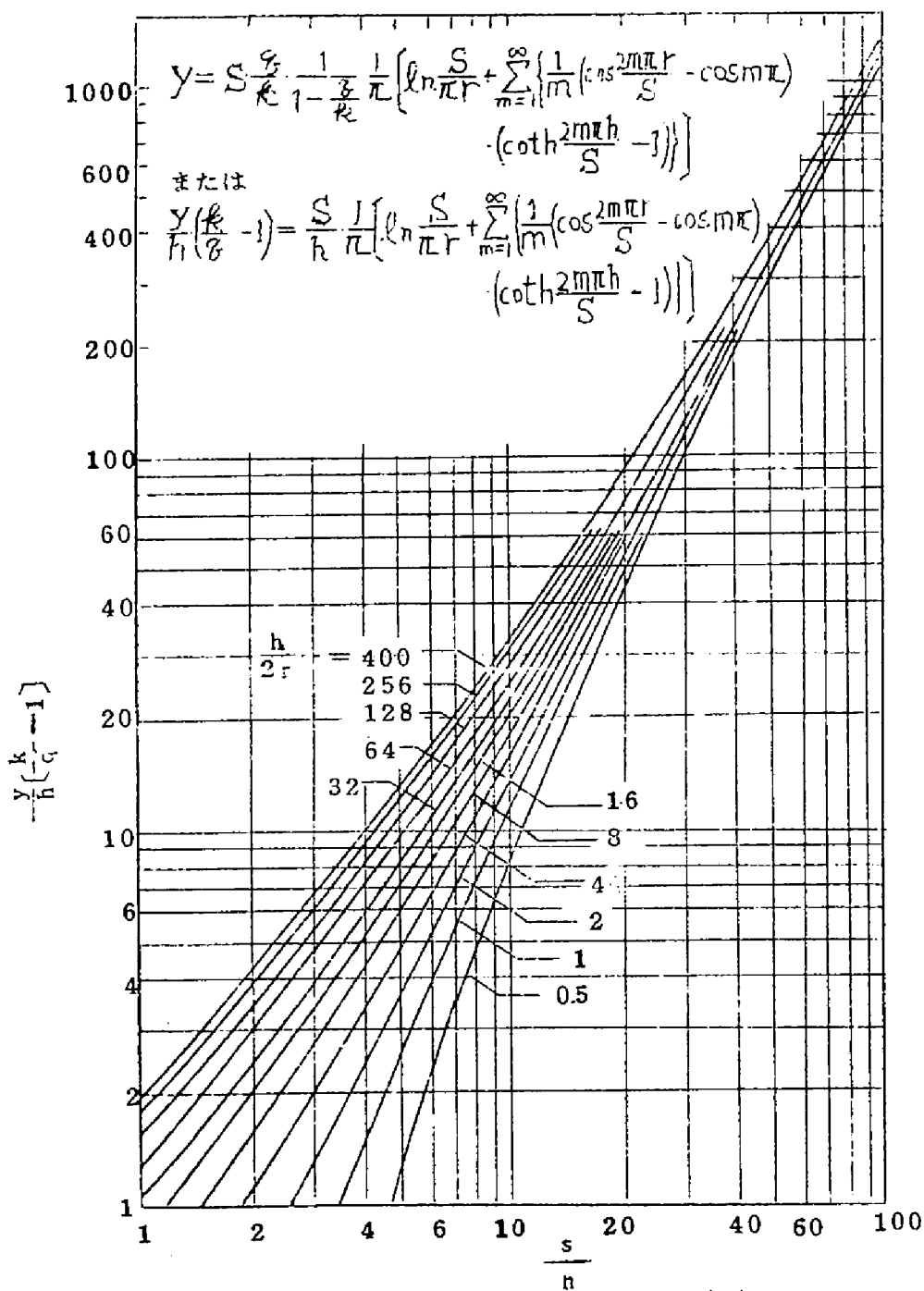


Fig. 1 - 3 Kirkham の暗キ 3 間隔公式 <sup>8) 9)</sup>

降雨強度が小さくて地下水面があまり高くなく、かつ不透層がかなり深い場合には十分に適用しうるものと思われる。

Talsma and Haskew<sup>10)</sup> および丸山<sup>11)</sup>は、現地試験あるいは室内模型実験の結果から、種々の暗キヨ間隔公式の適用性について考察を加えた結果、一般に Hooghoudt の式および Kirkham の式が比較的良好に適合することを示している。また、Wesseling<sup>12)</sup>によれば、Hooghoudt の式と Kirkham の式は一般の場合 5% 以内の差異でよく一致する結果を与えることが示されている。

最近では、Hammad<sup>13)</sup>, List<sup>14)</sup>, Dagan<sup>15)</sup> 16), Kirkham<sup>17)</sup> らが、それぞれにいろいろな手法を用いて定常暗キヨ排水に関する理論の解析を行なっている。

まず Hammad は、土壌が上方にも無限に存在すると考え、無限上方において均等な降雨が与えられるという条件で、複素関数論によって解析を行なった。List は、鏡像の原理を応用して不透層面に対する鏡像を考えることにより、不透層面をゆるやかな波形の曲線におきかえるだけで、他の境界条件に対してはすべて厳密に解を得ている。

Dagan は、Hooghoudt と同様にして流れの領域を二つに分け、暗キヨに近い部分では地下水面における境界条件が近似的に線型化できると仮定し、暗キヨから離れた部分では Dupuit - Forchheimer の仮定が成立つと考えて、地下水面形の近似式を導いた。Dagan はまた、上下二層から成る成層土壌の場合に対しても同様な近似法を用いて解析を行なっている。Kirkham は暗キヨを 2 次元的な点吸源と仮定した他は特別な仮定を用いずに、複素関数論によって巧みに数学的厳密解を得ている。

しかしながら、これらの解析結果は非常に複雑であり、実際の暗キヨ排水の設計に際しては必ずしも実用に適しているとはいえないようである。

実際の水田では、土壌のキ裂の存在や不均一性の問題、あるいは成層性等の複雑な問題が残されていることから考えれば、数学的にはいかに厳密な解であってもそれがそのまま実際の流れの状況を表わしているとは限らない。

式の誘導過程は必ずしも厳密ではなくとも、簡単な式で表わされ、あるいは図

長化されていて計算に便利な Hooghoudt の式 (1-1) あるいは Kirkham の理論 (Fig. 1-3) が暗キヨ排水の設計に十分適用しうるものと考えられる。

以上の理論はすべて毛管帯の影響を無視して導かれたものであるが、Childs<sup>18)</sup> <sup>19)</sup> は van Deemter のホドグラフ法による解析に毛管帯の影響を考慮して修正を加えた。また、Bouwer<sup>20)</sup> は Resistance Network を用いて毛管帯を考慮に入れた場合の暗キヨ排水の問題について実験を行なっている。その結果、毛管帯の存在は地下水面の位置にかなりの影響を及ぼすものであることが明らかにされているが、粘質土壌の水田においては毛管帯の厚さが大きく、したがってその排水に及ぼす影響もかなり大きいと考えられるので、その取り扱いには十分注意する必要がある。

つぎにタン水状態の場合には、非タン水状態の場合に比較して境界条件が簡単になるので、その解析も比較的容易となる。この場合には土壌全体が飽和浸透をしていると考え、流れは Laplace 方程式に従うポテンシャル流として解析が行なわれている。

Kirkham<sup>21)</sup> はある有限深さに不透層が存在する均質土壌の場合について、鏡像の原理を用いてポテンシャル分布ならびに暗キヨ排水量の理論式を導いている。また、上下二層から成る成層土壌の場合についても解析を行なっている。<sup>22)</sup> この理論は、暗キヨを2次元的な点吸源と仮定した以外は特別な仮定を用いていないので、土壌が飽和状態で、流れが Laplace 方程式に従うポテンシャル流である限り、ほぼ厳密解に近いものと考えられる。

しかしながら、タン水状態の場合といえども、成層の状態が複雑になれば、理論的解析は非常に困難となり、実験的方法か relaxation 等の手段によらなければならない。Luthin<sup>23)</sup> は、Resistance Network を用いて、下に不透層があり、水平な三層から成る成層土壌の場合について実験を行ない、その結果、暗キヨは透水性の大きい層に埋設する方がより有効であることを明らかにした。

Luthin and Gaskell<sup>24)</sup>は、暗キヨ埋設溝を透水性の大きい表層で埋めもどした成層土壌の場合について、relaxationによってLaplace方程式の解析を行ない、その結果、流れはほとんど透水性の大きい埋めもどし部を通して暗キヨから排水されることを明らかにした。また、Evans and Ashcroft<sup>25)</sup>も同様な方法によって水平な三層から成る成層土壌の場合について、暗キヨ埋めもどし部の影響をかなり詳細に解析している。Fukuda<sup>26)</sup>は心土層以下を不透層と仮定し、水は表層と暗キヨ埋めもどし部のみを通して暗キヨから排水されると考えた場合について、等角写像法によって近似的に解析を行ない、暗キヨ排水における埋めもどし部の重要性を指摘している。

以上に述べたように、一般の暗キヨ排水の問題については古くからいろいろと研究が進められているが、成層土壌における暗キヨ排水については、境界条件の簡単な特定の場合についてしか研究がなされておらず、成層条件や境界条件が複雑な場合にはいろいろと不明な点が多く残されている。

わが国の水田においては、一般に耕盤が発達しており、また滞積過程の変化から複雑な成層状態をなしている場合が普通であるが、このような土層状態における暗キヨ排水の研究はあまり行なわれておらず、その設計方法も確立されていないようである。合理的な暗キヨ排水の設計のためにはその機構を明らかにすることが必要である。

また、一般に暗キヨ排水を必要とする水田は比較的粘質な土壌で、その透水性は非常に小さい場合が多い。それに対してわが国のように降雨強度が大きい場合には、地下水面が降雨と平衡して非タン水、定常状態となっていると考えられる場合はまれで、降雨があれば直ちに地表面にタン水が生じ、タン水・定常状態となって排水されるものと考えられる。さらにまた、大区画水田においては排水路間隔が大きくなること、および田面の均平度が不十分なことなどのために、中干し時や刈取り時などに地表排水だけで地表面タン水の排除を行なうことは困難であり、かなりの地表残留水が生ずることになる。このような地表残留水はその後の田面の乾燥、ひいては地耐力の増強に多大の影響を及ぼす

ものであるから、<sup>27)</sup> 暗キ≡排水の設計にあたっては地中の過剰水の排除のみでなく、地表残留水をも適時に迅速に排除することを考慮すべきであろう。

以上のような理由から、第1編では、地表面タン水・定常状態の暗キ≡排水について取り扱うことにする。



## 第 2 章 Resistance Network について<sup>24)</sup>

### I. Resistance Network

#### 1. Resistance Network の特徴

浸透流の基礎式は Laplace 方程式であるが、一般に Laplace 方程式の理論的解析は非常に困難であり、第 1 章で述べたように境界条件の簡単なある特定の場合についてしか理論解が得られていない。

とくに一般の水田にみられるように土壌が成層状態をなしている場合や、境界条件が複雑な場合には、relaxation か実験的方法によらなければならないが、relaxation では計算が複雑になるきらいがあり、また実験的方法にも種々の方法があつてそれぞれの特徴を有している。<sup>28)</sup>

そのうち Resistance Network は Laplace 方程式の relaxation による計算を電気アナログによって解くものであり、したがって境界条件が複雑な場合やあるいは土壌が成層状態をなしていて理論的に解析できない場合には有用な手段であると考えられるので、本研究においてはこの方法を用いて実験的研究を行なつた。以下に、Resistance Network についてその特徴を簡単に述べることにする。

この方法は De Pakh,<sup>29)</sup> Liebmann<sup>30)</sup>らが relaxation の原理と電気アナログの方法とを結びつけて開発したもので、Luthin<sup>29)</sup>はこの方法を用いて暗キヨ排水の問題を取り扱い、この方法が成層土壌中における浸透流の解析に有用な手段であることを示した。

電気アナログとは、電流の Ohm の法則と浸透流の Darcy の法則との相似性を利用した一種の実験的方法であつて、簡単な操作によって比較的精

度のよい結果を得ることができるものである。また境界条件が複雑な場合においても相似な模型を作ることによって解析できるので、浸透流の研究にはしばしば用いられている方法である。これは使用する抵抗体によって conducting sheet 法、液体法およびカン天法などに分けられ、それぞれの特徴を有しているが、<sup>28) 31)</sup> 成層土壌中における浸透流の解析に使用するには、取り扱いに難点があつて適当な方法であるとはいえない。

これに対して Resistance Network は抵抗体として電気抵抗器を格子状に連結したものを使用する。

したがって電気アナログの一種とも考えられるものであり、透水係数の変化を表わすには相当する抵抗器の容量を透水係数に逆比例して変えればよいので簡単かつ確実であり、この点が他の方法に比較してすぐれている点である。したがってこの方法は成層土壌中における浸透流の研究には有力な手段であると考えられる。

ただ、この Resistance Network の精度は net の粗さに最も大きく影響されるので、精度をあげるためにはかなり net を細かくとる必要がある。

## 2. Resistance Network の原理

Resistance Network の基礎原理を簡単に述べるとつぎのようである。

<sup>23)</sup> 簡単のために土壌は均質等方性であるとし、2次元の流れの領域について考え、Fig. 1 - 4 に示すように  $x$ ,  $y$  軸に平行に間隔  $s$  の正方形格子を組む。浸透流のポテンシャル  $H$  に関する Laplace 方程式

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = 0 \quad (1-2)$$

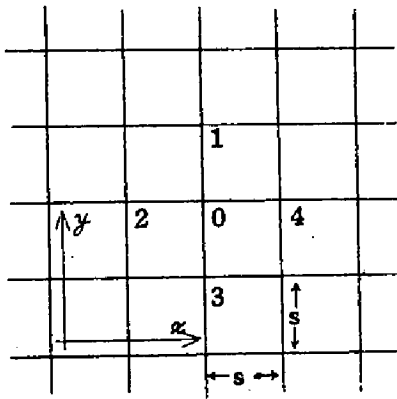


Fig. 1-4 差分格子

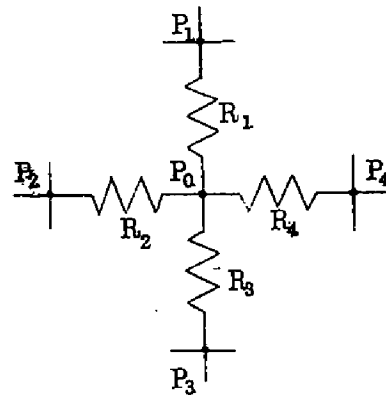


Fig. 1-5 Network 原理図

を差分方程式に書きなおして整理すると

$$\frac{1}{s^2} \cdot (H_1 + H_2 + H_3 + H_4 - 4H_0) = 0 \quad (1-3)$$

したがって

$$H_0 = \frac{1}{4} (H_1 + H_2 + H_3 + H_4) \quad (1-4)$$

ただし、添字は Fig. 1-4 に示されている各節点における値を示すものである。

つぎに、Fig. 1-5 に示すような network の一部を考え、周辺の 4 節点から中央の節点  $P_0$  に向って流れる電流の強さをそれぞれ  $i_1, i_2, i_3, i_4$  とすれば、Kirchhoff の法則から

$$i_1 + i_2 + i_3 + i_4 = 0 \quad (1-5)$$

これに Ohm の法則を適用すれば、

$$\frac{V_1 - V_0}{R_1} + \frac{V_2 - V_0}{R_2} + \frac{V_3 - V_0}{R_3} + \frac{V_4 - V_0}{R_4} = 0 \quad (1-6)$$

となる。ただし、 $V_i$  は電位、 $R_i$  は電気抵抗値であり、添字は Fig. 1-5 に示されている各節点における値を示すものである。

土壌は均質・等方性であるから、 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$  となり、(1-6) 式はつぎのようになる。

$$\frac{1}{R} (V_1 + V_2 + V_3 + V_4 - 4V_0) = 0 \quad (1-7)$$

あるいは

$$V_0 = \frac{1}{4} (V_1 + V_2 + V_3 + V_4) \quad (1-8)$$

(1-4) 式と (1-8) 式を比較すれば明らかなように、これらは全く相似形をなしているから、Fig. 1-5 のような network を組むことによって (1-4) 式を実験的に解くことができる。

(1-4) 式は Laplace 方程式 (1-2) 式の relaxation の基礎式であるから、Resistance Network とは relaxation の計算を電気アナログによつて解くものであるといふことができる。

したがって、relaxation と電気アナログの両方の長所を兼ね備えているところにこの方法の特徴がある。

### 3. Resistance Network の製作

以上のように Resistance Network は取り扱いの容易さおよび精度の

点ですぐれており、とくに成層土壌中における浸透流の解析には有用な手段であると考えられるので、これを試作し、実験を行なった。その簡単な配線図をFig.1 - 6 に示すが、これは普通の電気アナログと同じものである。

電源としては、取り扱いが簡単で電圧も比較的安定している3ボルト乾電池を用いた。

network に使用する抵抗器としては、固定抵抗器と可変抵抗器の2種類が考えられるが、ここでは同じ抵抗器でいろいろな条件の場合の実験が行なえるように可変抵抗器を使用した。

一般に network の精度は net の粗さに最も大きく影響され、とくに暗キ $\equiv$ 近傍においてはポテンシャルの変化がはげしく流れが集中するので、この部分では net 間隔を細かくとることが望ましい。したがってここでは、Fig. 1-7 に示すように暗キ $\equiv$ 近傍の net 間隔を暗キ $\equiv$ から離れた部分の net 間隔の  $1/2$  と細かくとることによって精度の向上を期した。

その結果、使用した電気抵抗器の数は218個となった。抵抗器の数を増せばさらに精度のよい結果が得られるものと思われるが、後述するようにこの程度の network でも、実用上十分に満足すべき精度の解を得ることができる。

その全体の装置をFig.1 - 8 に示す。

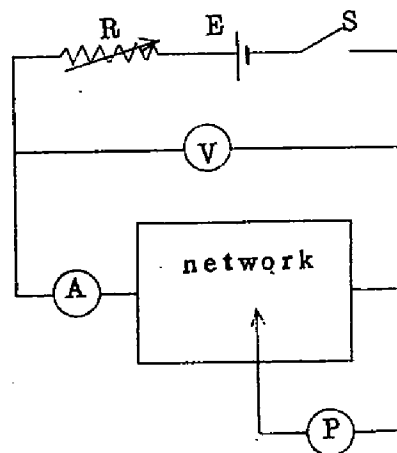


Fig.1 - 6 network 配線図

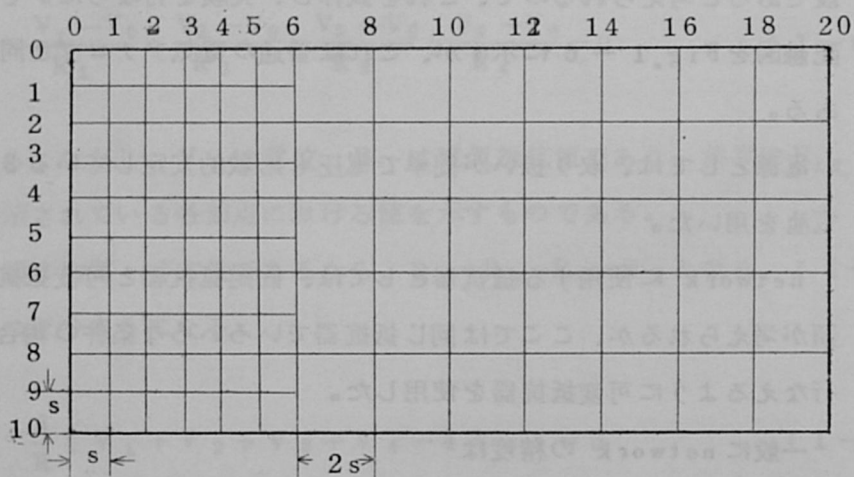


Fig. 1 - 7 network の 格子

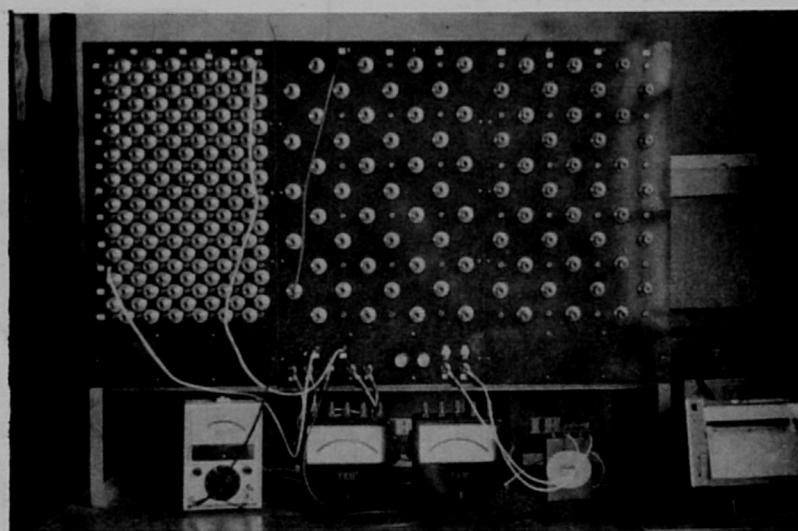


Fig. 1 - 8 network の 全景

#### 4. 境界条件の設定

Resistance Networkを用いて浸透流の解析を行なう場合には、まず実験に先立って、解くべき問題の境界条件を満足するように、networkの抵抗器を調節しておかなければならない。ここでは、それらの境界条件のうちの主なものについて簡単に述べることにする。<sup>29) 30)</sup>

##### (1) 不透層面

Fig.1 - 9 に示されているように、不透層面に接する network の一部を考える。この network において2点間の抵抗を通る流れは、図のように横線を施した菱形の部分を通る流れを表わすものとする。不透層面上にある net ABを通る流れの流断面積は内部の net CDを通る流れの流断面積の半分となる。流れの抵抗は流断面積に逆比例するから、不透層面における net の抵抗  $R_{AB}$  は内部の net の抵抗 (基準抵抗値)  $R_0$  の2倍となるように調節すればよい。

すなわち、

$$R_{AB} = 2 R_0 \quad (1-9)$$

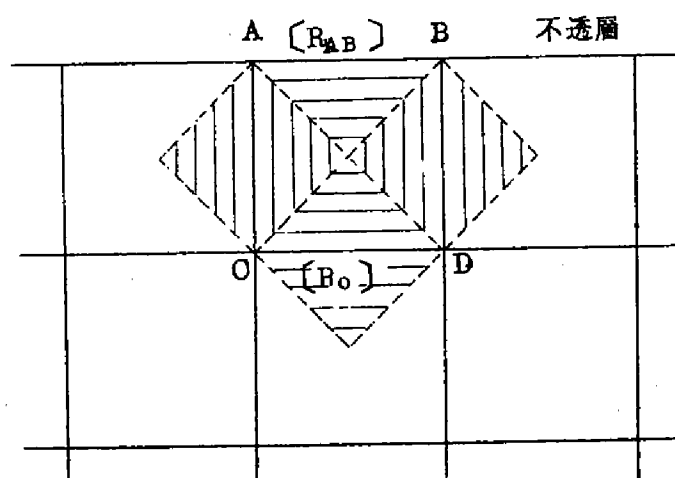


Fig.1 - 9 不透層面における境界条件

(2) 成層面

Fig. 1 - 10 のように透水係数の異なる2層の境界面において、上層の透水係数を  $k_1$ 、下層の透水係数を  $k_2$  とすれば、浸透流と電流の相似性から

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad (1-10)$$

ただし、 $\sigma_i$  は電気伝導度、 $R_i$  は基準抵抗値であり、添字は上層および下層を示す。

つぎに、Fig. 1 - 10 の横線を施した菱形の部分の上半分を通る流れの抵抗は、不透層面の場合と同様に考えれば、 $2R_1$  となり、下半分については  $2R_2$  となる。

したがって、成層面における全抵抗  $R$  はこれらの2抵抗の並列接続したものと考えて、

$$R = \frac{2R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (1-11)$$

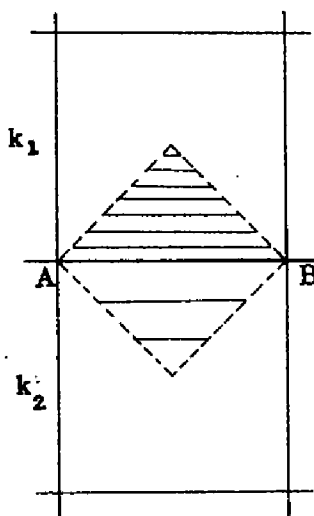


Fig. 1 - 10

成層面における境界条件



となる。

### (3) networkの分割

Fig. 1 - 7 に示すように、network の精度を向上させるために、一部の net 間隔を  $1/2$  に細分した場合の抵抗の接続の状態は Fig. 1-11 に示すとおりとなる。すなわち、分割の境界面においては抵抗を他の部分の 2 倍となるようにすればよい。

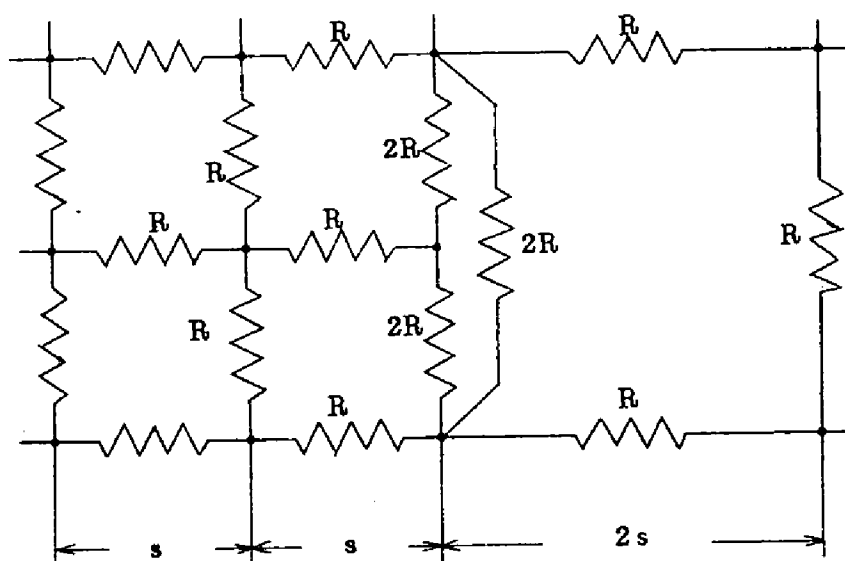


Fig. 1 - 11 network の分割

## 5. 実験方法

まず network の各抵抗器を、解くべき問題の境界条件にしたがって調節したのち、Fig. 1 - 6 の抵抗  $R$  を調整して、network にかかる全電位差がちょうど 1.000 ボルトになるようにする。

これはあとで流線網を描いたり、浸透量を計算したりする場合に便利のためである。

network にかかる全電位差を 1.000 ボルトに調整するには、電位差

計 P を利用して正確に行なう。

電圧計 V には電流計 A による電位降下も含まれているので正確ではない。

電圧計 V は測定中の電源電圧の変動をチェックするためだけに用いればよい。

network の設定ができれば、電位差計 P によって各節点の電位を測定して、等ポテンシャル線を描くことができる。流線はこれと直交するように図解的に描いてもよいが、反転の方法を用いれば直接正確に求めることができる。23) 31)

浸透量 Q は、network にかかる全電位差を  $\Delta V$ 、電流の強さを  $i$ 、network の電気伝導度を  $\sigma$  とすれば、電流と浸透流の相似性から次式によって求められる。

$$\frac{Q}{i} = \frac{k}{\sigma} \cdot \frac{\Delta H}{\Delta V} \quad (1-12)$$

あるいは、Q を無次元化して表わすと

$$\frac{Q}{k \cdot \Delta H} = \frac{i}{\sigma \cdot \Delta V} = \frac{R_0 i}{\Delta V} \quad (1-13)$$

となる。ただし、 $k$  は土壌の透水係数、 $\Delta H$  は実際に作用するポテンシャル差であり、 $R_0$  は network の基準抵抗値で、 $R_0 = 1/\sigma$  である。

## II. 暗キヨ排水問題への応用

### 1. 暗キヨ管壁における境界条件

前述したように、Resistance Networkの原理はrelaxationと全く同じものであるため、境界条件の設定についてもrelaxationの場合と同様に考えることができる。ただ、この方法を暗キヨ排水の問題に適用する場合には、暗キヨ管壁においては境界がnetと一致しないばかりか流れが複雑となるので、境界条件の取り方が問題になる。

Luthin<sup>29)</sup>によれば、暗キヨ管壁における境界条件の取り方として、Fig. 1-12に示されているように境界が複雑でnetの中間を通るような場合には2点A Q間の抵抗値 $R_{AQ}$ は次式で求められる。

$$R_{AQ} = \frac{s-r}{s} \cdot R_0 \quad (1-14)$$

ここで、 $s$ はnetの間隔、 $r$ は暗キヨの半径、 $R_0$ は基準抵抗値である。

ここで暗キヨ半径 $r$ がnet間隔 $s$ に比べて十分に小さくなった場合を考える。この場合には、暗キヨへの浸透量(暗キヨ排水量)は0に近づくはずであるが、(1-14)式において $r \rightarrow 0$ とすれば $R_{AQ} \rightarrow R_0$ となり浸透量は0とはならない。したがって、 $r$ が $s$ に比べて小さい場合には、(1-14)式は十分正確な境界条件を与えなくなると考えられる。

これは浸透路長が単純に短縮されたものと考えられたためである。実際には流れは暗キヨに向って集中するから、このような流線の収束による抵抗をも考慮にいれて $R_{AQ}$ を決めなければならない。

このような考えから、Vimokeら<sup>32)</sup>はFig. 1-12において2辺AB, BCと暗キヨ管壁PQの間の抵抗を考え、AB, BCを等ポテンシャル線

として次式を導いた。

$$R_{AQ} = \frac{4 Z_0}{Z'_0} \cdot R_0 \quad (1-15)$$

ただし、 $Z_0 = 138 \log \rho + 6.48 - 2.38A - 0.48B - 0.12C$

$$\rho = \frac{s}{r}$$

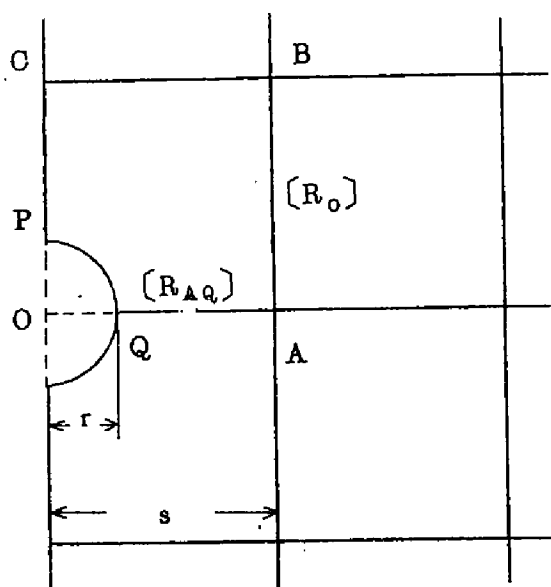


Fig. 1 - 12 暗キ管壁における境界条件(1)

$$A = \frac{1 + 0.405 \rho^{-4}}{1 - 0.405 \rho^{-4}}$$

$$B = \frac{1 + 0.163 \rho^{-8}}{1 - 0.163 \rho^{-8}}$$

$$C = \frac{1 + 0.067 \rho^{-12}}{1 - 0.067 \rho^{-12}}$$



$$R_{AQ} = \int dR = \frac{1}{\sigma} \int \frac{s}{r} \frac{dx}{\pi/2 \cdot x} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{\sigma} \ln \frac{s}{r} \quad (1-16)$$

あるいは、 $R_0 = 1/\sigma$  であるから

$$R_{AQ} = \frac{2}{\pi} \ln \frac{s}{r} \cdot R_0 \quad (1-17)$$

すなわち (1-17) 式は、流れは暗キヨ近くでは暗キヨの中心 O に向って流れ、等ポテンシャル線は O を中心とした同心円であると考えた場合の  $R_{AQ}$  の値を与えるものである。

(1-17) 式の計算結果と、Luthin の式 (1-14)、および Vimoke の式 (1-15) の計算値を  $r/s$  の値に対して図示すると Fig. 1-14 のようになる。

## 2. 均質土壌における暗キヨ排水の実験

暗キヨ管壁における境界条件として以上に述べた Luthin 式、Vimoke 式および (1-17) 式を比較するために、また試作した network の精度を確かめることを目的として、すでに理論解の求められている均質土壌中における暗キヨ排水について、つぎのような実験を行なった。

すなわち Fig. 1-15 に示されているように、流れの対称性から、領域 ABCD の部分のみを考え、暗キヨ間隔  $S$  を 5 m、暗キヨの深さ  $d$  を 1 m とし、地表面から不透層までの深さ  $l$  が 1.25 m および 5 m の 2 つの場合について、暗キヨ半径  $r$  を net 間隔  $s$  に対していろいろに変化させて、地表面タン水・定常状態の場合の実験を行なった。

この時の net 間隔  $s$  は、 $l = 1.25$  m の場合で 12.5 cm、 $l = 5$  m の場合で 25 cm である。

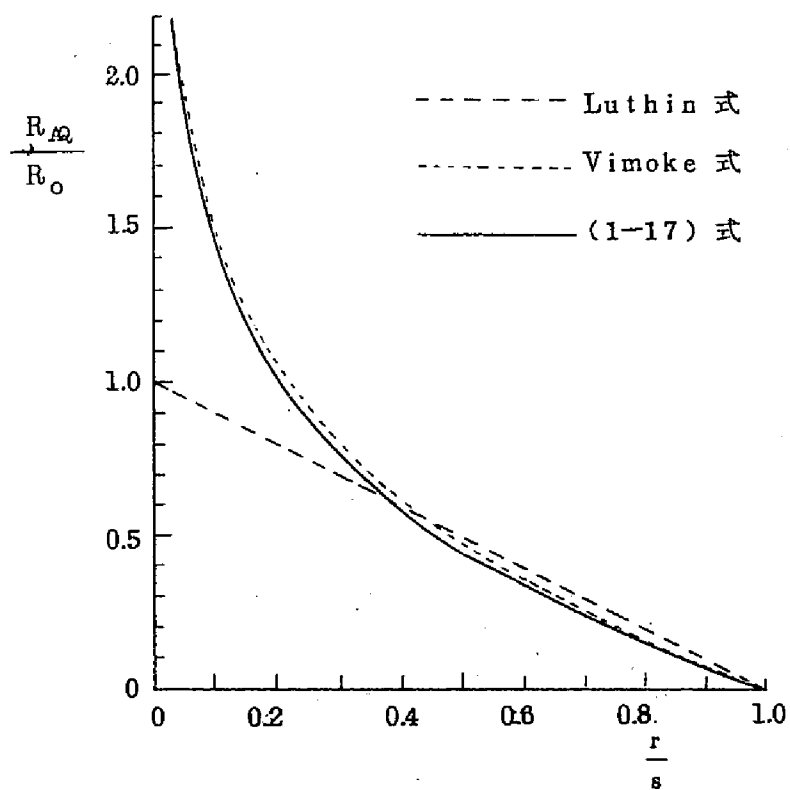


Fig.1 - 14 暗キ管壁における境界条件の比較

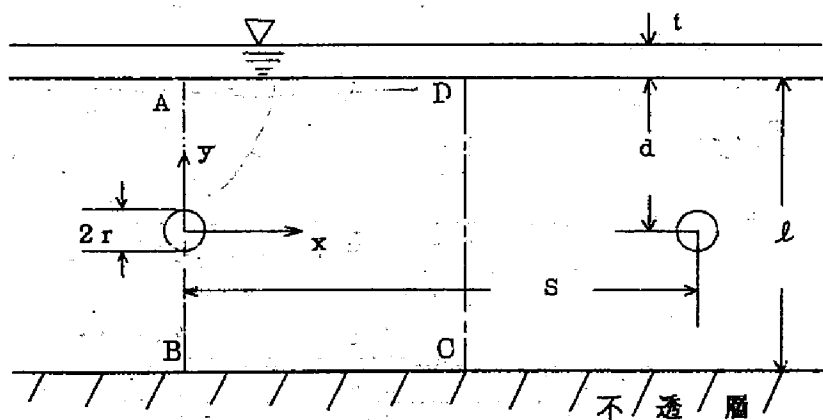


Fig.1 - 15 均質土壌における実験の記号図

暗キ管壁における境界条件として、Luthin式、Vimoke式および(1-17)式によって求めた $R_{AQ}$ を用いて実験を行ない、(1-13)式によって単位長さ当りの暗キ管排水量 $Q/k \cdot \Delta H$ を計算した結果をTable 1-1、Table 1-2およびFig. 1-16, Fig. 1-17に示す。

### 3. Network の精度に関する検討

Fig. 1-15のように有限深さに不透層が存在する均質土壌中における暗キ管排水の理論的解析としては、Kirkham<sup>21)</sup>が鏡像の原理を用いてつぎのような式を導いている。

ポテンシャル分布；

$$H = \frac{Q}{4\pi k} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \ln \left[ \frac{\cosh \frac{\pi(x-mS)}{2l} - \cos \frac{\pi y}{2l}}{\cosh \frac{\pi(x-mS)}{2l} + \cos \frac{\pi y}{2l}} \right]$$

$$\cdot \left[ \frac{\cosh \frac{\pi(x-mS)}{2l} + \cos \frac{\pi(y-2d)}{2l}}{\cosh \frac{\pi(x-mS)}{2l} - \cos \frac{\pi(y-2d)}{2l}} \right] + d + t \quad (1-18)$$

暗キ管排水量；

$$\frac{Q}{k \cdot \Delta H} = \frac{2\pi}{F} \tan \frac{\pi(2d-r)}{4l}$$

$$F = \ln \frac{\pi r}{\tan \frac{\pi r}{4l}} + \sum_{m=1}^{\infty} \ln \left[ \frac{\cosh \frac{\pi m S}{2l} + \cos \frac{\pi r}{2l}}{\cosh \frac{\pi m S}{2l} - \cos \frac{\pi r}{2l}} \right]$$

$$\cdot \left[ \frac{\cosh \frac{\pi m S}{2l} - \cos \frac{\pi(2d-r)}{2l}}{\cosh \frac{\pi m S}{2l} + \cos \frac{\pi(2d-r)}{2l}} \right] \quad (1-19)$$



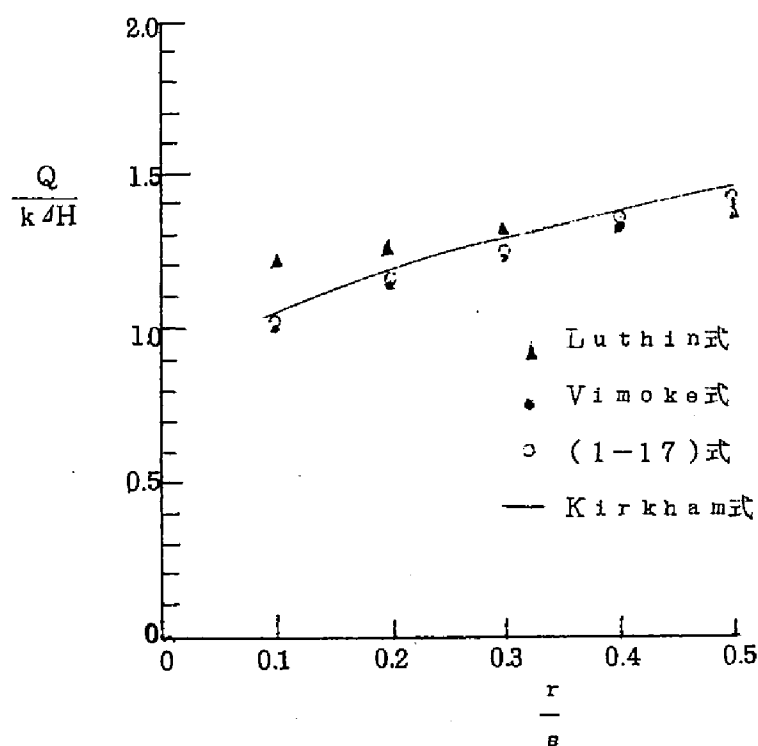


Fig. 1-16 暗キ排水量の比較 ( $\ell=1.25\text{ m}$ )

Table 1-1 暗キ排水量の比較 ( $\ell=1.25\text{ m}$ )

$\frac{r}{s}$	暗キ排水量 ( $Q/k\Delta H$ )				Kirkham 式との偏差 (%)		
	Luthin 式	Vimoke 式	(1-17) 式	Kirkham 式	Luthin 式	Vimoke 式	(1-17) 式
0.1	1.202	1.010	1.030	1.052	+14.3	-4.0	-2.1
0.2	1.242	1.140	1.160	1.190	+4.4	-4.2	-2.5
0.3	1.286	1.244	1.262	1.289	-0.2	-3.5	-2.1
0.4	1.380	1.324	1.340	1.370	-2.9	-3.4	-2.2
0.5	1.376	1.388	1.404	1.440	-4.4	-3.6	-2.5

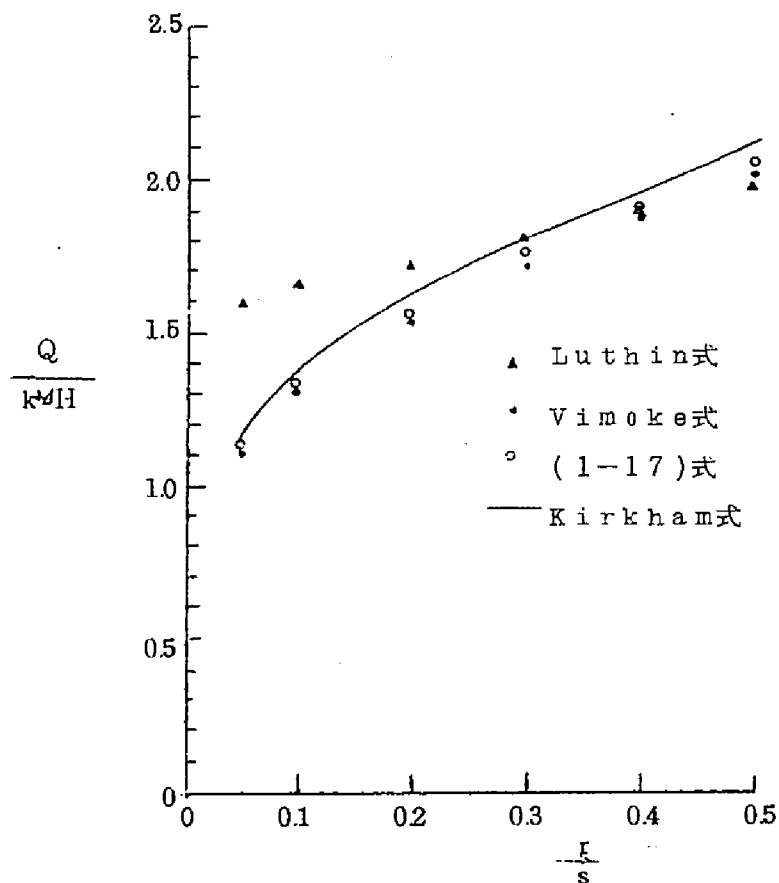


Fig 1-17 暗キ排水量の比較 ( $\ell = 5m$ )

Table 1-2 暗キ排水量の比較 ( $\ell = 5m$ )

$\frac{r}{s}$	暗キ排水量 ( $Q/KH$ )				Kirkham 式との偏差 (%)		
	Luthin 式	Vimore 式	(1-17) 式	Kirkham 式	Luthin 式	Vimore 式	(1-17) 式
0.05	1.580	1.122	1.125	1.189	+32.9	-5.6	-5.4
0.1	1.626	1.295	1.317	1.369	+18.8	-5.4	-3.8
0.2	1.704	1.530	1.550	1.612	+5.7	-5.1	-3.8
0.3	1.790	1.704	1.736	1.800	-0.6	-5.3	-3.6
0.4	1.884	1.862	1.900	1.961	-3.9	-5.0	-3.1
0.5	1.962	1.990	2.030	2.108	-6.9	-5.6	-3.7

式中の記号は Fig. 1 — 15 に示すとおりである。

この理論式は、暗キヨを 2 次元的な点吸源と仮定しているために暗キヨ半径  $r$  が大きくなると精度が悪くなること、および Fig. 1 — 14 によれば  $r/s$  が大きいところでは 3 本の曲線はそれほど違った値を示さないことなどから、実験結果との比較にあたっては  $r/s \leq 0.5$  の範囲において検討をすすめることにする。

まず暗キヨ排水量についてみると、Luthin 式は  $r/s \leq 0.2$  では誤差が大きくなり、不適当であることがわかる。

Vimoke 式を用いた場合には理論値とかなりよく一致しているようであるが、それでも 3 ～ 6 % の誤差を示しており、(1—17) 式に比較してやや大きい誤差を与えているようである。したがって、(1—17) 式が最も妥当な境界条件を与えるといえることができる。

ポテンシャル分布についても同様なことがいえる。すなわち、(1—18) 式による理論値と実験値とを比較した結果を述べると、Luthin 式による場合は暗キヨ近傍では誤差が大きくなることは Luthin<sup>23)</sup> も指摘しているが、この実験においても  $r/s = 0.05$  の時に全ポテンシャル差の 2.1 %、 $r/s = 0.1$  で 1.2 %、 $r/s = 0.2$  で 5 % の誤差となった。これに対して Vimoke 式および (1—17) 式による場合はいずれも理論値とよく一致しており、誤差は 1 ～ 2 % 以内であったが、(1—17) 式による方が全体的にみて誤差が少なくなることが確かめられた。暗キヨ近傍におけるポテンシャルの誤差の比較の一例を示すと Fig. 1—18 のとおりである。

以上のことから明らかなように、暗キヨ管壁における境界条件を Luthin 式によって求める場合には、 $r/s$  が小さい時には不適当であり、また、Vimoke 式によるよりも (1—17) 式によって求める方がより精度の高い結果を得ることができる。さらに (1—17) 式は Vimoke 式よりも計算がはるかに簡単であるため、実用に適していると考えられる。

また Table 1—1 および Table 1—2 から明らかなように、各実験

値の誤差は net 間隔  $s$  が小さい場合 ( $\ell = 1.25 \text{ m}$ ) ほど少なくなっていることがわかる。

Liebmann<sup>30)</sup> によれば、network の精度に影響する最も大きな因子は net の粗さであるが、以上の諸結果からみて、この network の精度は実用上十分に満足できるものであると考えられる。

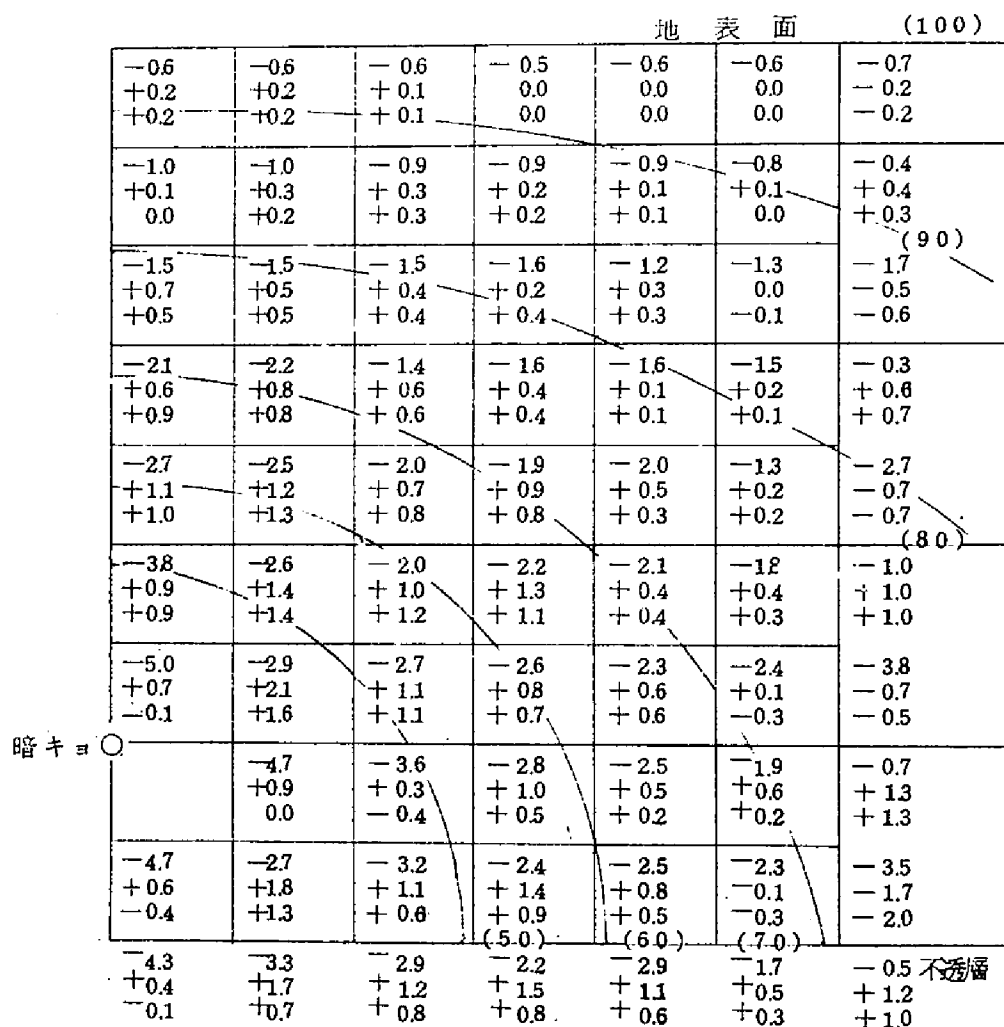


Fig. 1 - 18 ポテンシャル分布の各実験値と Kirkham 式との比較 ( $\ell = 1.25 \text{ m}$ ,  $r/s = 0.2$ )、上段・Luthin 式、中段・Vimoke 式、下段・(1 - 17) 式

なお、network の精度を高めるためのひとつの方法として、network による実験結果を relaxation の第一近似として用いる方法もあるが、ここで確かめられた精度から判断すれば、一般にはその必要はないであろう。

ここで述べた network の精度に関する検討は、理論解の求められている均質土壌の場合についてしか行なわれていないが、この方法の原理にまで立ちもどって考えてみると、流れが Laplace 方程式に従うものであるかぎり、成層土壌の場合においても適用しうるものと考えられる。

#### 4. 地表面における浸透強度分布

暗キヨ排水の問題を取り扱う場合には、全体の浸透量すなわち暗キヨ排水量はもちろん重要であるが、地表面における浸透強度分布、すなわち暗キヨからの距離による浸透強度の変化も重要な問題である。

Resistance Networkにおいては、つぎのような方法で直接に浸透強度分布を求めることができるので便利である。

すなわち、地表面においては流線は鉛直であるから、地表面に沿った最上段の net の上下端に Darcy 法則を適用すれば、浸透強度  $q$  は近似的につぎのようになる。

$$q = k \cdot \frac{\Delta h}{s} \quad (1-20)$$

ここで、 $\Delta h$  は最上段の net ( 間隔  $s$  ) の上下端に作用するポテンシャル差であり、ポテンシャル分布から求められる。これより、 $q$  を無次元化して表わせば、

$$\frac{q}{k \cdot \Delta H / \ell} = \frac{\Delta h \cdot \ell}{\Delta H \cdot s} \quad (1-21)$$

となる。

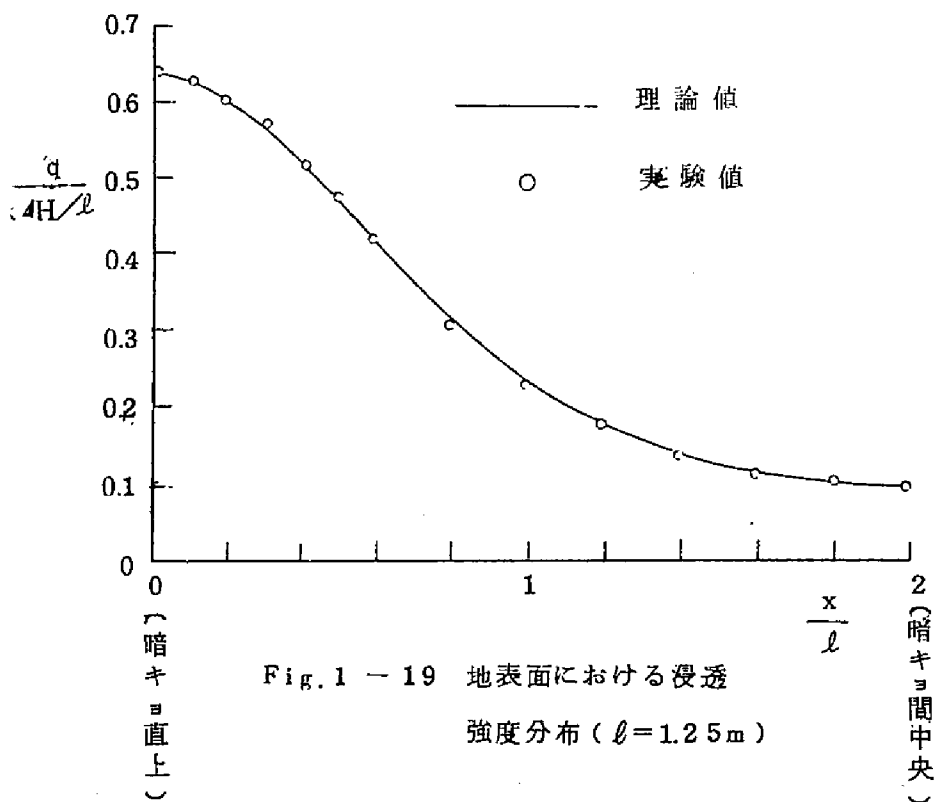


Fig. 1 - 19 地表面における浸透  
強度分布 ( $\ell = 1.25\text{m}$ )

実験結果から (1-21) 式を用いて地表面における浸透強度  $q$  の分布を求め、暗キヨ直上からの距離  $x/\ell$  に対して図示すると Fig. 1 - 19, Fig. 1-20 のようになる。

一方、丸山<sup>11)</sup> は Kirkham による理論解 (1-18) 式から浸透強度分布を求める式として次式を導いている。

$$q = k \left( \frac{\partial H}{\partial y} \right)_{y=d}$$

$$= \frac{Q}{2\ell} \sin \frac{\pi d}{2\ell} \cdot \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{\cosh \frac{\pi(x-mS)}{2\ell}}{\cosh^2 \frac{\pi(x-mS)}{2\ell} - \cos^2 \frac{\pi d}{2\ell}} \quad (1-22)$$

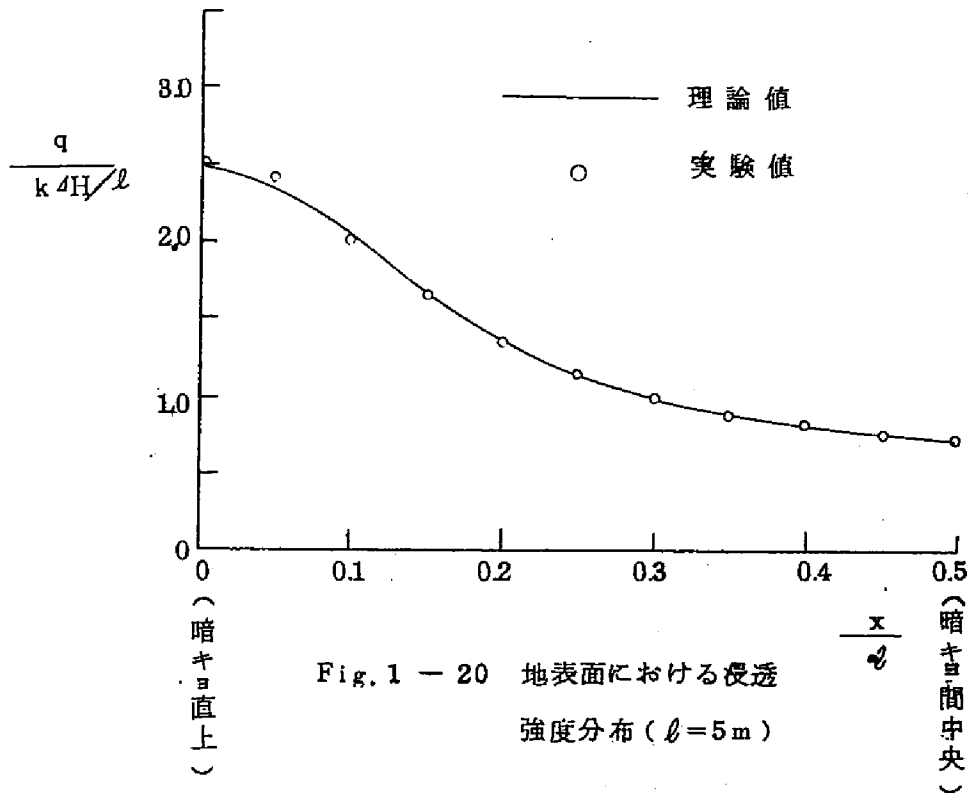


Fig. 1 - 19、Fig. 1 - 20には、(1-22)式による計算値をも実線で示してあるが、実験値と計算値とは非常によく一致しており、(1-21)式による浸透強度分布の求め方の妥当性を示しているものと考えられる。

### 第3章 成層土壌における暗キヨ埋めもどし部の排水効果<sup>35) 36)</sup>

#### 1. 成層土壌における暗キヨ排水の実験

##### 1. 実験の目的および方法

前章において、Resistance Network は暗キヨ排水の研究に有用な解析法であることを明らかにし、試作した network の精度が実用上十分に満足すべきものであることを確かめることができたので、これを用いて成層土壌における暗キヨ排水の実験を行なった。

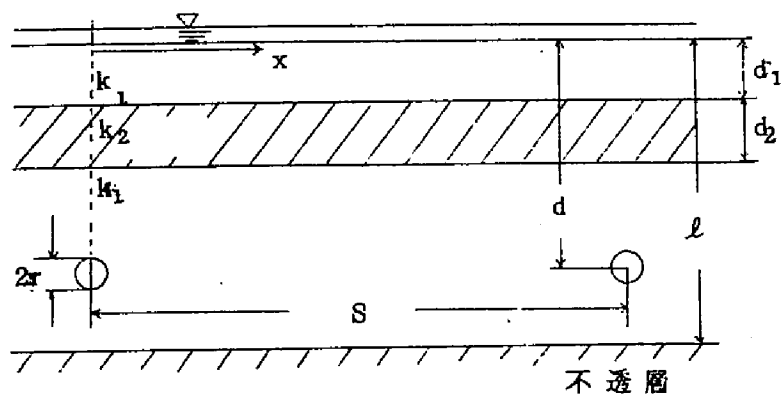
成層土壌中における暗キヨ排水に関する従来の研究として、Luthin and Gaskell<sup>24)</sup>, Evans and Ashcroft<sup>25)</sup>, および Fukuda<sup>26)</sup> らは、暗キヨ埋めもどし部の排水に及ぼす影響を取り扱い、その重要性を指摘しているが、さらにこの暗キヨ埋めもどし部の効果を積極的に暗キヨ排水の改良に応用することが考えられる。

このような観点から、本章においては成層土壌中における暗キヨ排水の基礎的な問題、とくに暗キヨ埋めもどし部の排水効果について考究することにする。すなわち、Fig. 1 - 21 に示すような成層条件の場合を考え、耕盤と暗キヨ埋めもどし部の暗キヨ排水に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

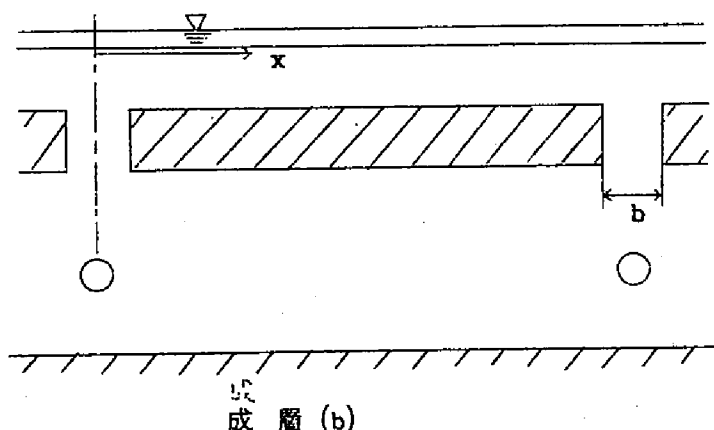
Fig. 1 - 21 において、成層(a)では地表面下  $d_1$  なる深さに厚さ  $d_2$  の透水性の小さい層がある場合で、耕盤の発達している一畝の水田でよくみられるものである。

透水係数は上層および下層を  $k_1$ 、中層を  $k_2$  で表わす。成層(b) では暗キヨ埋めもどし部が粗な状態となっており、一様に透水係数  $k_1$  を有すると考えられる場合、あるいは排水をよくするために透水係数  $k_1$  の土で埋





成層 (a)



成層 (b)

Fig.1 - 21 成層土壌における実験の記号図

めもどしを行なった場合である。

以上のいずれの場合においても、暗キ $\equiv$ 間隔  $S$  を 5 m、不透層までの深さ  $l$  を 1.25 m、暗キ $\equiv$  H U 半径  $r$  を 2.5 cm とした。また、耕盤の深さに関しては  $d_1 = d_2 = 2.5$  cm とし、暗キ $\equiv$ 埋めもどし部の幅  $b$  は 2.5 cm

とした。暗キヨの深さ  $d$  は  $0.75\text{ m}$  と  $1\text{ m}$  の 2 つの場合を考え、透水係数の比  $k_1/k_2$  をいろいろに変化させて実験を行ない、暗キヨ排水量および土壌中のポテンシャル分布を測定した。

## 2. 実験結果

実験の結果得られた暗キヨ排水量  $Q$  を無次元化して  $Q/k_1 \Delta H$  で表わし、これと透水係数の比  $k_1/k_2$  の関係を Fig. 1 - 23 に、代表的な流線網の例を Fig. 1 - 24, Fig. 1 - 25 に示す。また、地表面における浸透強度分布  $\frac{q}{k_1 \Delta H / \ell}$  を (1 - 21) 式に従って計算した結果を  $k_1/k_2$  のいろいろな値に対して図示すると Fig. 1 - 26, Fig. 1 - 27 のとおりとなる。

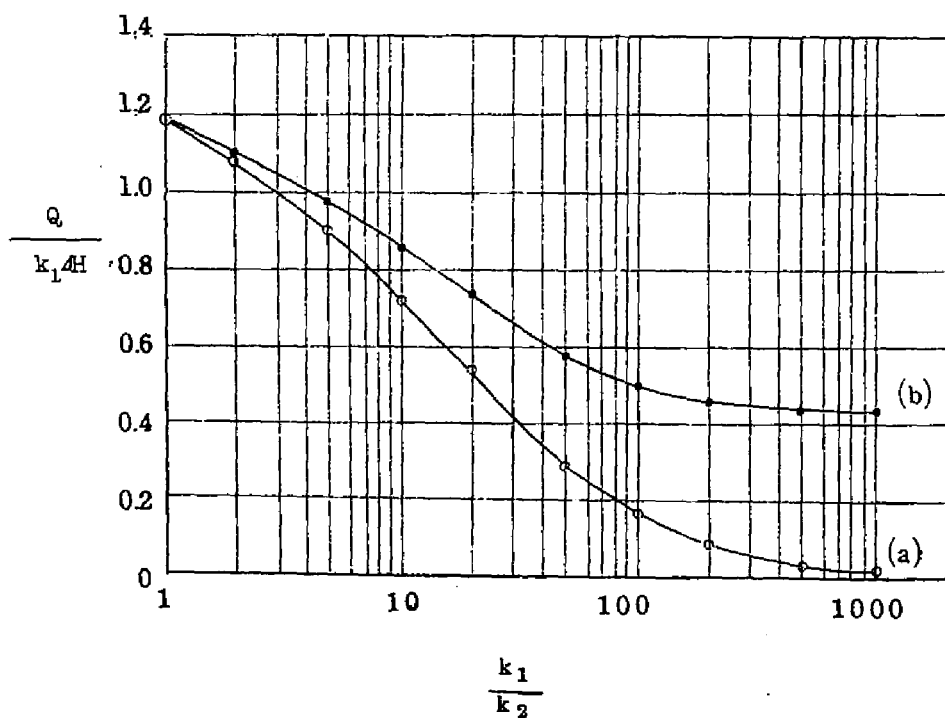


Fig. 1 - 22  $k_1/k_2$  による暗キヨ排水量の変化 ( $d=1\text{ m}$ )

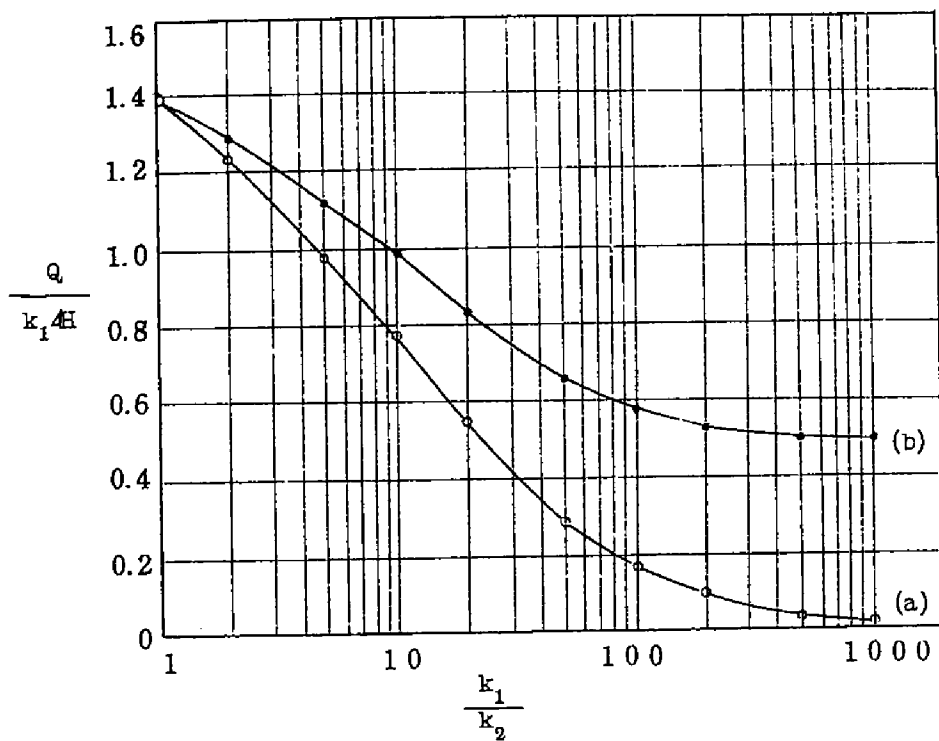


Fig. 1 — 23  $k_1/k_2$ による暗キ排水量の変化

(  $d = 0.75 \text{ m}$  )

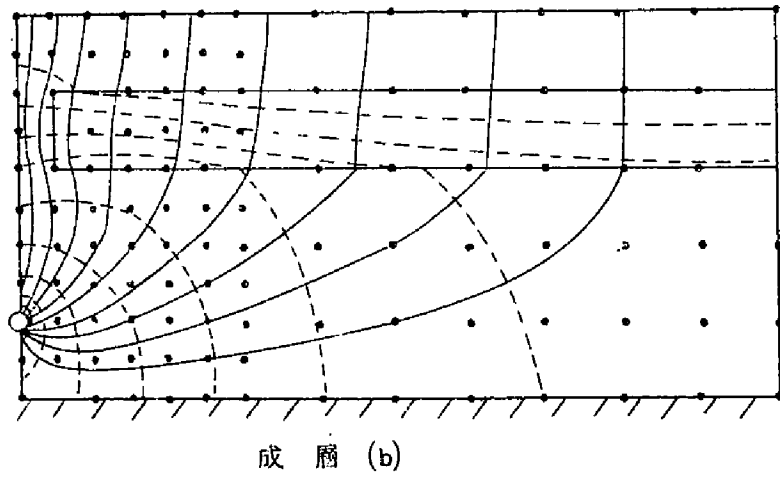
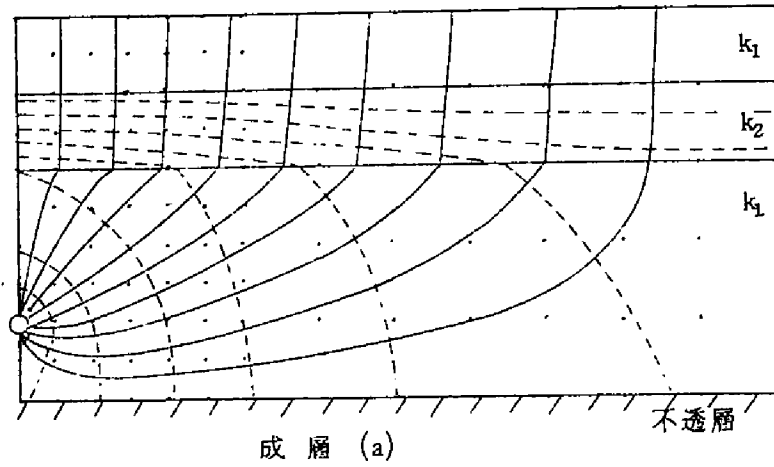
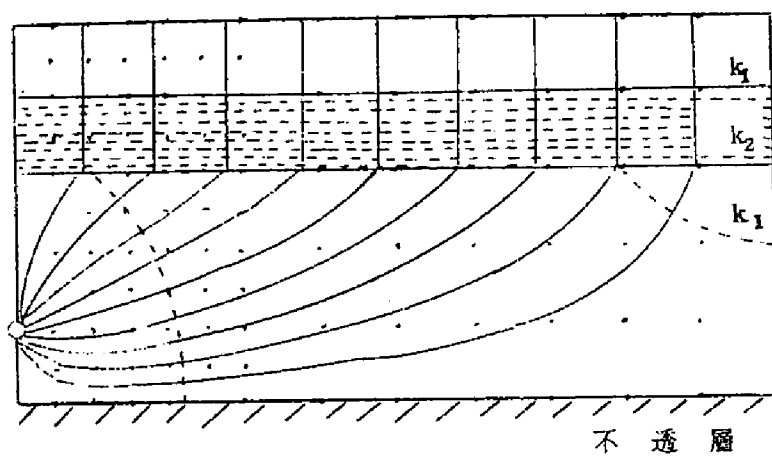
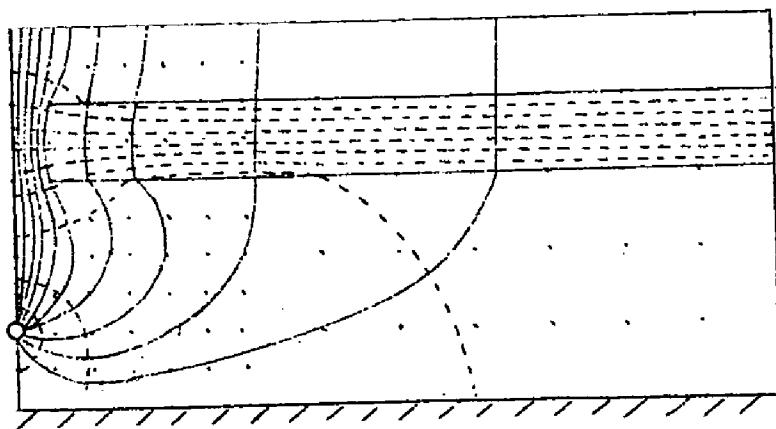


Fig. 1 - 24 流線網 ( $k_1/k_2=10$  ,  $d=1m$  )



成層 (a)



成層 (b)

Fig. 1 - 25 流線網 ( $k_1/k_2=100$ ,  $d=1m$ )

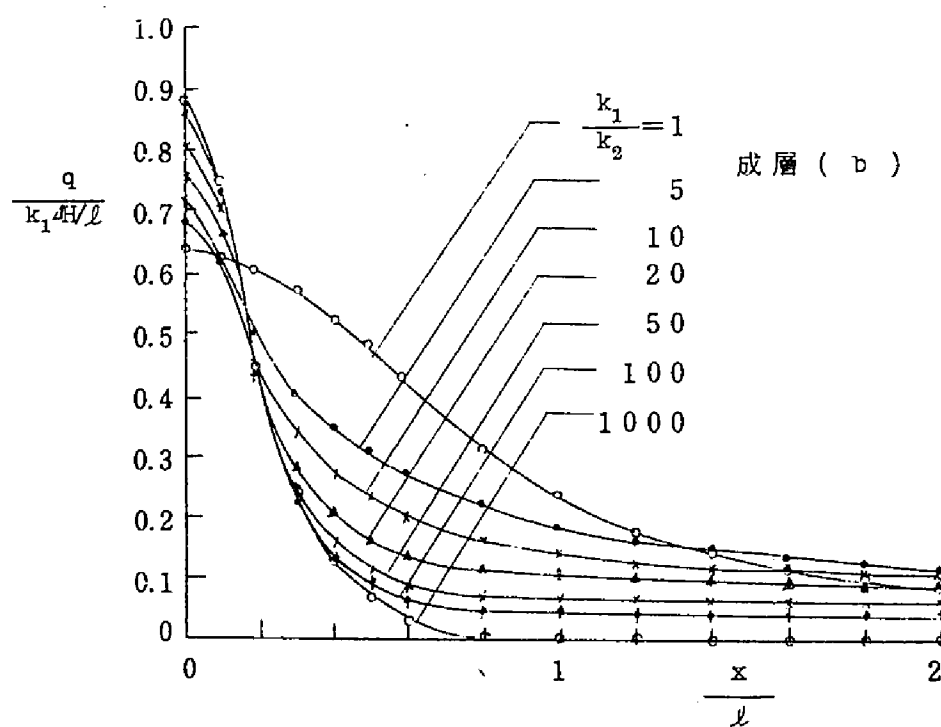
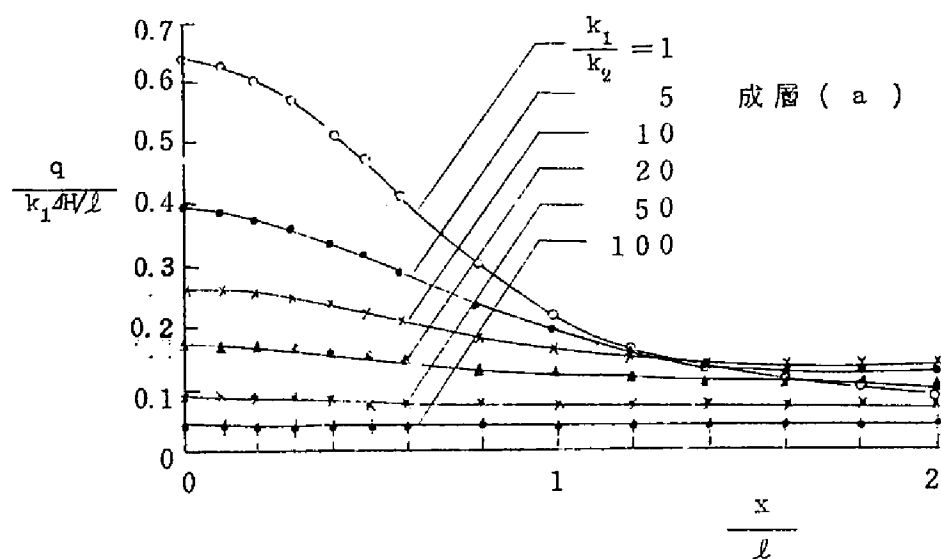


Fig. 1 - 26 地表面における浸透強度分布

(  $d = 1 \text{ m}$  )

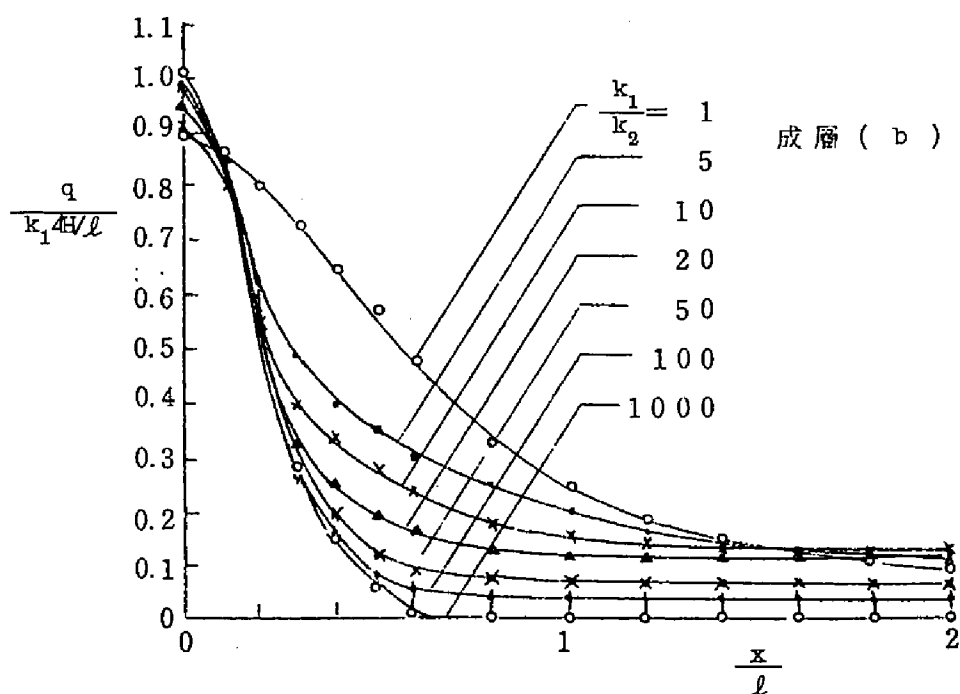
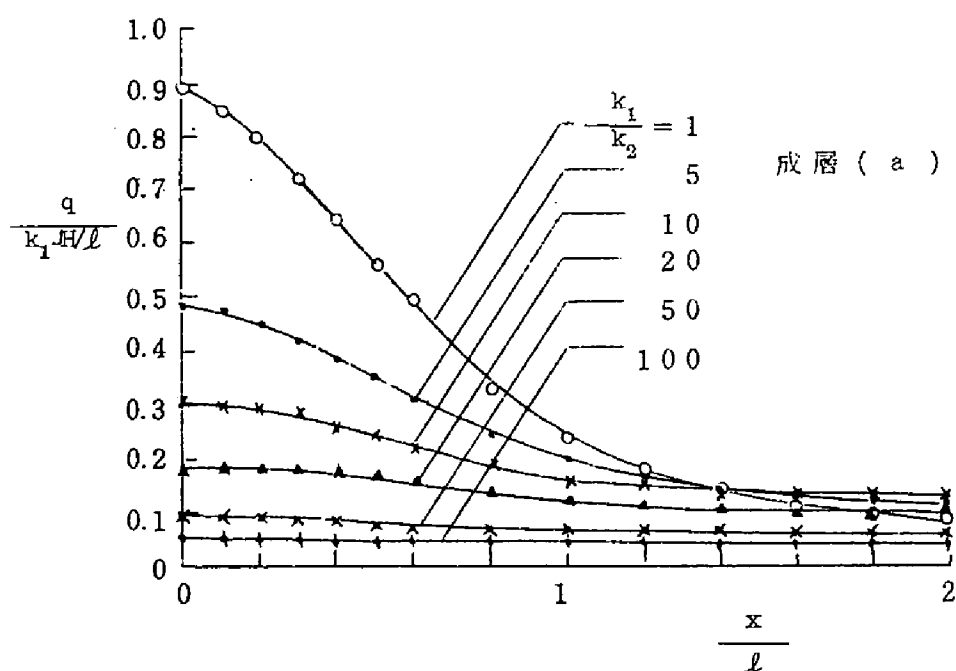


Fig 1 - 27 地表面における浸透強度分布

(  $d = 0.75 \text{ m}$  )

### 3. 実験結果の検討

#### (1) 暗キヨ排水量

まず、暗キヨ排水量  $Q/k_1 \Delta H$  と透水係数の比  $k_1/k_2$  の関係をみると、Fig. 1 - 22, Fig. 1 - 23 から明らかなように、 $k_1/k_2 < 100$  では排水量は片対数紙上では直線的に減少しているが、 $k_1/k_2 > 100$  になると  $k_1/k_2 \rightarrow \infty$  すなわち  $k_2 = 0$  の場合に漸近するようになり、ほぼ一定値を示している。

したがってこのような場合、 $k_1/k_2 > 100$  であれば近似的に中層 ( $k_2$  層) を不透層とみなすことができる。

成層 (a) と (b) の場合を比較すると、(b) の方が常に排水量が多い値を示しているのは当然であるが、その差は  $k_1/k_2$  が大きくなるほど増大している。

#### (2) 地表面における浸透強度分布

地表面における浸透強度分布 (Fig. 1 - 26, Fig. 1 - 27) をみると、成層 (a) の場合には、一般に暗キヨの近くでは大きく暗キヨから遠去かるにつれて減少しているが、これを  $k_1/k_2$  との関係でみると、暗キヨ近くでは  $k_1/k_2$  が大きくなるほど減少しており、暗キヨ間中央付近ではほとんど変化していない。すなわち、 $k_1/k_2$  が大きくなれば浸透強度分布は暗キヨからの距離に関係せず、均平化されることがわかる。

それに対して成層 (b) では、流れは暗キヨ埋めもどし部に集中しており暗キヨ直上における浸透強度はむしろ  $k_1/k_2$  が大なるほど大きい値を示している。そして暗キヨから離れるにしたがい急激に減少しており、(a) の場合とほとんど等しい分布となっている。

#### (3) 流線網

Fig. 1 - 24, Fig. 1 - 25 に示されている流線網は、流れの状態を比較するために、ポテンシャルおよび浸透量をそれぞれ 10 等分する



ように描いたものであるが、これによれば暗キヨ埋めもどし部に流れが集中している状態がいっそう明らかである。

また、このことから、暗キヨ埋めもどし部の状態が暗キヨ排水に及ぼす影響は非常に大きいものであることがわかる。

## Ⅱ. 暗キヨ埋めもどし部の排水効果

### 1. 排水量算定の前提条件

ここでは前述した実験結果に基づいて、暗キヨ排水量の算定法について考察を加え、あわせて暗キヨ埋めもどし部の排水効果について検討を行なう。

一般に成層土壌中における暗キヨ排水の理論的解析は非常に困難であるが、ここで取り扱った成層条件の場合には、Fig. 1-24, Fig. 1-25 に示す実験結果から、上層および中層における流線はほぼ鉛直となり、等ポテンシャル線は水平に近くなることが確かめられている。このような場合には、丸山<sup>11)</sup>の等価土層の概念を応用して近似的に排水量を計算することができる。すなわち Darcy 法則から、各層の損失水頭は透水係数に逆比例し、層の厚さに比例するから、中層 ( $k_2$  層) の厚さ  $d_2$  を  $k_1/k_2$  倍にし、その透水係数は  $k_1$  なる均質土壌の場合を考えればよいことになる。

ただし、このようにすれば中層は非等方性となるから、Fig. 1-24, Fig. 1-25 の場合のように、流線が鉛直な場合にしか適用できない。したがって中層の厚さや暗キヨの深さ等にも関係すると思われるが、ここで取り扱った成層条件の場合には、この仮定は十分に成立しうるものと考え

えられる。

## 2. 暗キ≡埋めもどし部を考慮しない場合

上に述べた仮定を適用すれば、成層 (a) の場合の仮想の暗キ≡深さ  $d'$  および不透層までの深さ  $\ell'$  は

$$d' = d + \left( \frac{k_1}{k_2} - 1 \right) d_2 \quad (1-23)$$

$$\ell' = \ell + \left( \frac{k_1}{k_2} - 1 \right) d_2 \quad (1-24)$$

となる。

$k_1/k_2$  のいろいろな値に対して、 $d$  ,  $\ell$  のかわりにこれらの  $d'$  ,  $\ell'$  を計算し透水係数  $k_1$  なる均質土壌の場合を考えて暗キ≡排水量  $Q/k_1 \Delta H$  を計算した結果は Table 1-3 に示すとおりである。計算は Kirkham の理論式 (1-19) 式によって行なった。また、Table 1-3 には Fig. 1-22 , Fig. 1-23 の実験結果をも併記して計算値と比較してあるがこれらはかなりよく一致しており、このような計算方法が実用的にみて妥当なものであることを示しているものと考えられる。

Table 1-3 成層 (a) の場合の暗キ≡排水量  $Q/k_1 \Delta H$  の比較

$k_1 / k_2$		5	10	20	50	100	200	500	1000
$d = 1 \text{ m}$	計算値	0.935	0.753	0.554	0.303	0.173	0.093	0.039	0.020
	実験値	0.900	0.722	0.528	0.286	0.166	0.091	0.039	0.020
	偏差 (%)	3.7	4.1	4.7	5.6	4.0	2.2	0.0	0.0
$d = 0.75 \text{ m}$	計算値	1.052	0.829	0.589	0.311	0.176	0.093	0.039	0.020
	実験値	0.980	0.765	0.545	0.294	0.170	0.092	0.039	0.020
	偏差 (%)	6.8	7.7	7.5	5.5	3.4	1.1	0.0	0.0

### 3. 暗キ≡埋めもどし部を考慮した場合

成層(b)の場合には、暗キ≡埋めもどし部の排水効果を表わす係数として、 $\alpha$ をつぎのように定義する。

$$\alpha = \frac{Q_b - Q_a}{Q_0 - Q_a} \quad (1-25)$$

ここで、 $Q_0$ は均質土壌の場合の暗キ≡排水量、 $Q_a$ 、 $Q_b$ はそれぞれ成層(a)、(b)の場合の排水量である。

これより

$$Q_b = \alpha \cdot Q_0 + (1 - \alpha) Q_a \quad (1-26)$$

となる。

すなわち、 $\alpha$ は中層( $k_2$ 層)によって減少する排水量( $Q_0 - Q_a$ )に対する暗キ≡埋めもどし部によって増加する排水量( $Q_b - Q_a$ )の割合であり、この $\alpha$ を用いれば(1-26)式によって $Q_b$ を求めることができる。

Fig. 1-22, Fig. 1-23に示した実験結果から、 $k_1/k_2$ のいろいろな値に対して(1-25)式によって $\alpha$ を計算した結果はTable 1-4に示すとおりである。

これより近似的に暗キ≡深さdのいずれの場合に対しても、

$$\alpha \approx \text{const.} = 0.34 \quad (1-27)$$

とすることができる。

Table 1-4 成層(b)の場合の係数 $\alpha$ の値

$k_1 / k_2$	5	10	20	50	100	200	500	1000
$d = 1\text{m}$	0.261	0.299	0.314	0.325	0.330	0.338	0.338	0.348
$d = 0.75\text{m}$	0.320	0.347	0.338	0.333	0.332	0.335	0.335	0.345

ところで、 $d = 1 \text{ m}$ の場合には $Q_0 = 1.190$ 、 $d = 0.75 \text{ m}$ の場合には $Q_0 = 1.405$ であるから、※ (1-26)式はつぎのようになる。

$d = 1 \text{ m}$  ( $d/s = 0.2$ ) の場合；

$$Q_b = 0.40 + 0.66 Q_a \quad (1-28)$$

$d = 0.75 \text{ m}$  ( $d/s = 0.15$ ) の場合；

$$Q_b = 0.48 + 0.66 Q_a \quad (1-29)$$

成層 (a) の場合の排水量  $Q_a$  を前述の方法で求めておけば、成層 (b) の場合の排水量  $Q_b$  は (1-28) および (1-29) 式によって簡単に計算することができる。

$\alpha$  が const ということは、暗キヨ埋めもどし部の排水効果が  $k_1/k_2$  の値のいかにかわからず、等しく有効であることを示すものである。

このことは、Fig. 1-26, Fig. 1-27 に示す地表面における浸透強度分布からも説明される。すなわち成層 (b) の場合、暗キヨ埋めもどし部においては  $k_1/k_2$  の値にかかわらず、均質土壌 ( $k_1/k_2 = 1$ ) の場合とほぼ等しい浸透強度であるが、暗キヨから離れた所では成層 (a) の場合と等しい浸透強度分布を示している。

このことは埋めもどし部における排水効果が const. であることを示すものである。またこのことから、(1-26)式の右辺第一項  $\alpha \cdot Q_0$  は埋めもどし部を通して流れる排水量を、右辺第二項  $(1-\alpha) Q_a$  はその他の部分を通る排水量を表わしていることがわかる。

また、以上の結果から判断すれば、 $\alpha \neq \text{const.}$  であるから、暗キヨ埋めもどし部の幅や中層の厚さなどの諸条件が異なっている場合においても、 $k_1/k_2$  の任意の値における  $\alpha$  の値、例えば  $k_1/k_2 = \infty$ 、すなわち  $k_2 = 0$  の時の  $\alpha$  の値のみが何らかの方法で求められれば、(1-26)式によっ

---

※ 実際は無次元化した排水量  $Q_0/k \Delta H$  が 1.190 であるが、ここでは簡単のために  $Q_0 = 1.190$  とした。以下同様

て成層 ( b ) の場合の排水量  $Q_b$  の算定式を得ることができる。

ここで  $k_2 = 0$  の場合には  $Q_a = 0$  となり、( 1-25 ) 式はつぎのように簡単になる。

$$\alpha = \left( \frac{Q_b}{Q_0} \right)_{k_2 = 0} \quad (1-30)$$

## Ⅱ. 等角写像法による暗キヨ排水量の算定

### 1. 暗キヨ排水量の算定

Ⅱで、暗キヨ埋めもどし部の影響を考慮した成層 ( b ) の場合、透水を規制する耕盤 (  $k_2$  層 ) の透水係数を 0 と考えた場合の暗キヨ排水量をなんらかの方法で求めることができれば、透水係数の比が任意の値を有する一般の場合についても、簡単な式によって暗キヨ排水量を決定することができることを明らかにした。

したがってここでは、耕盤の透水係数を 0 とし、浸透水は暗キヨ埋めもどし部のみを通して流れると考えた場合の暗キヨ排水量の算定法について考えることにする。それは、このような場合の暗キヨ排水量についての解析結果が数式またはグラフで表わされれば、暗キヨ埋めもどし部の幅やその透水係数などの暗キヨ排水量に及ぼす影響がなおいっそう明確になり、合理的な暗キヨ排水の設計にも意義をもつものと考えからである。

一般に、浸透流の理論的解析には等角写像の方法が広く用いられているが、この方法は均質土壌で、しかも境界条件が比較的簡単な場合にしか用いることはできない。

したがって、境界条件の複雑な一般の場合には、Resistance Network を用いて実験的に解くのが便利であるが、しかしここで取り扱っているよ

うな条件の場合には、前述の実験結果に基づいて2,3の仮定を行なうこと  
によって等角写像の方法を応用することができる。

# (1) 仮定と条件

Fig. 1 - 28 に示すような条件の成層土壌中における暗キヨ排水に  
ついて考えるが、この場合、耕盤の透水係数は0、すなわち完全な不透  
水層であるとし、役透水は暗キヨ埋めもどし部のみを通して流れるもの  
と仮定する。

便宜上、表層を第Ⅰ層、耕盤の埋めもどし部を第Ⅱ層、下層を第Ⅲ層  
とよぶことにし、第Ⅰ層の厚さを $d_1$ 、第Ⅱ層の厚さを $d_2$ 、第Ⅲ層の  
上端から暗キヨまでの深さを $d_3$ 、第Ⅲ層の厚さを $d_4$ とする。  
すなわち、地表面から測った暗キヨの深さを $d = d_1 + d_2 + d_3$ 、不透層  
までの深さを $\ell = d_1 + d_2 + d_4$ とする。また各層の透水係数はそれぞ  
れ $k_1, k_2, k_3$ とし、暗キヨ間隔を $S$ 、暗キヨ半径を $r$ 、埋めもどし部  
の幅を $b$ とする。

暗キヨ排水量の算定にあたっては第Ⅰ層、第Ⅱ層、第Ⅲ層に分けて、  
それぞれ各層ごとに解析を行なう。すなわち、各層の境界面を等ポテン  
シャル面と仮定して、各層ごとに等角写像の理論を用いて解析を行ない  
最後にそれらの結果を総合して暗キヨ排水量を求めることにする。

なおここでは、簡単のために暗キヨ間隔 $S$ と不透層の深さ $\ell$ を無限大  
と仮定して解析をすすめるが、この仮定の妥当性についてはあとで検討  
を加える。

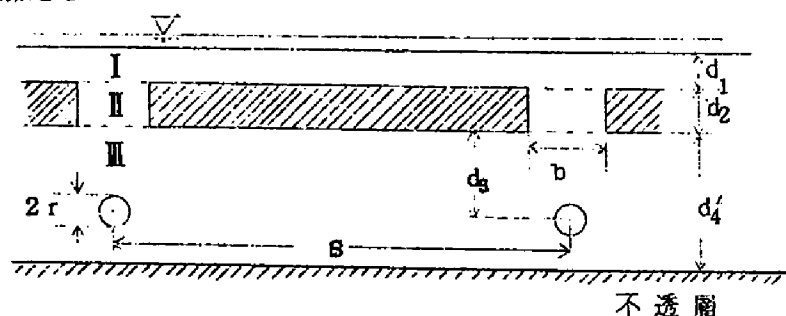


Fig. 1 - 28 暗キヨ排水量の算定における記号図

(2) 第 I 層における解析

第 I 層においては、Fig. 1 - 29を参照すれば、 $z$  平面を  $\zeta$  平面の上  
半平面に等角写像する写像関数は Schwarz - Christoffel 変換によ  
りつぎのようにして求められる。

$$z = c_1 \int \frac{d\zeta}{\zeta^2 - m^2} + c_2 \quad (1-31)$$

これを積分して、定数  $c_1, c_2$  を決定すれば

$$\zeta = m \cdot \tanh \frac{\pi z}{2d_1} \quad (1-32)$$

となる。E 点においては  $\zeta = (1, 0)$ ,  $z = (b/2, 0)$  であるから

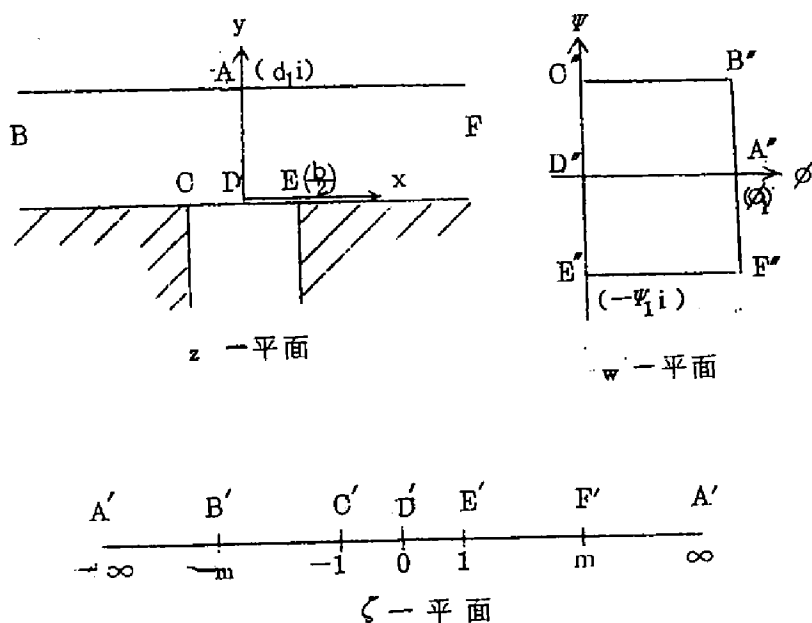


Fig. 1 - 29 第 I 層における Schwarz -  
Christoffel 変換

$$m = \frac{1}{\tanh \frac{\pi b}{4d_1}} \quad (1-33)$$

したがって、写像関数は次式のようになる。

$$\zeta = \frac{\tanh \frac{\pi z}{2d_1}}{\tanh \frac{\pi b}{4d_1}} \quad (1-34)$$

つぎに、 $\zeta$  平面を  $w$  平面に等角写像する写像関数も同様にして Schwarz-Christoffel 変換により

$$w = c_1 \int \sqrt{\frac{d\zeta}{(\zeta^2 - 1)(\zeta^2 - m^2)}} + c_2 \quad (1-35)$$

ここで  $k^* = 1/m$  とおき、定数  $c_1, c_2$  を決定すれば

$$w = -i \cdot \frac{\Phi_1}{K'} \int_0^\zeta \frac{d\zeta}{\sqrt{(1 - \zeta^2)(1 - k^{*2} \zeta^2)}} \quad (1-36)$$

E 点においては  $w = (0, -i\psi_1)$   $\zeta = (1, 0)$  であるから

$$-i\psi_1 = -i \frac{\Phi_1}{K'} \cdot K \quad (1-37)$$

したがって、

$$\frac{\psi_1}{\Phi_1} = \frac{K}{K'} \quad (1-38)$$



ただし、 $K, K'$  はそれぞれ  $k^*$  および  $k^{*/'} = \sqrt{1 - k^{*2}}$  を母数とする第一種完全長円積分であり、 $k^*$  は (1-33) 式から

$$k^* = \frac{1}{m} = \tanh \frac{\pi b}{4 d_1} \quad (1-39)$$

で求められる。

いま、第Ⅰ層に作用するポテンシャル差を  $\Delta H_1$  とすれば、第Ⅰ層における浸透量  $Q_1$  は次式のようにになる。

$$\frac{Q_1}{k_1 \Delta H_1} = 2 \cdot \frac{\psi_1}{\phi_1} = \frac{2K}{K'} \quad (1-40)$$

### (3) 第Ⅱ層における解析

第Ⅱ層においては、近似的に一次元降下浸透をしていると考えられるから、第Ⅱ層における浸透量  $Q_2$  は Darcy 法則により

$$\frac{Q_2}{k_2 \Delta H_2} = \frac{b}{d_2} \quad (1-41)$$

となる。ただし、 $\Delta H_2$  は第Ⅱ層に作用するポテンシャル差である。

### (4) 第Ⅲ層における解析

暗キ<sub>3</sub> 間隔  $S$  と不透層の深さ  $d_4$  を無限大と仮定すれば、第Ⅲ層においては、長さ  $b$  なる line source の垂直二等分線上  $d_3$  なる距離にある半径  $r$  の井戸への流れの問題となる。Muskat<sup>89)</sup> はこのような問題に対して、等角写像の理論と鏡像の原理を用いて、浸透量  $Q_3$  の計算式として次式を導いている。

$$\frac{Q_3}{k_3 \Delta H_3} = \frac{2 \pi}{\ln \frac{2 d_3}{r} \left( 1 + \frac{4 d_3^2}{b^2} \right)} \quad (1-42)$$

ただし、 $\Delta H_3$ は第Ⅲ層におけるポテンシャル差である。

(5) 暗キヨ排水量

求める暗キヨ単位長さ当りの排水量を $Q$ とすれば※流量連続の条件より

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 \quad (1-43)$$

また、地表面と暗キヨの間に作用する全体としてのポテンシャル差を $\Delta H$ とすれば、

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 \quad (1-44)$$

であるから、これらの両式と(1-40)、(1-41)、(1-42)式より次式を得る。

$$Q = \frac{\Delta H}{\frac{1}{k_1} \cdot \frac{K'}{2K} + \frac{1}{k_2} \cdot \frac{d_2}{b} + \frac{1}{2\pi k_3} \cdot \ell \ln \frac{2d_3}{r} \left(1 + \frac{4d_3^2}{b^2}\right)} \quad (1-45)$$

ここで、とくに $k_1 = k_2 = k_3 = k$ のときは、

$$\frac{Q}{k \Delta H} = \frac{1}{\frac{K'}{2K} + \frac{d_2}{b} + \frac{1}{2\pi} \cdot \ell \ln \frac{2d_3}{r} \left(1 + \frac{4d_3^2}{b^2}\right)} \quad (1-46)$$

となる。

## 2. 暗キヨ間隔と不透層の深さを考慮した場合の検討

以上は、暗キヨ間隔 $S$ と不透層の深さ $\ell$ を無限大と仮定して解析を行な

---

※ Ⅱの記号を使用すれば $(Q_b)_{k_2=0}$ であるが、ここでは簡単のために $Q$ で表わすことにする。

ったものであるが、この仮定が果して満足できるものかどうかを検討する必要がある。したがってここでは、それぞれの因子を考慮して解析を行ない、仮定の妥当性について検討を加えることにする。

#### (1) 第Ⅰ層における場合

まず第Ⅰ層においては、暗キヨ間隔  $S$  のみが関係するが、この場合については Fukuda<sup>26)</sup> がやはり等角写像法によって解析を行なっている。その結果によると、Table 1-5 に示されているように、一般には  $S/d_1 > 5$  であれば排水量  $Q_1/k_1 \Delta H_1$  は  $S$  の変化にはほとんど影響されないことがわかる。また、その結果がかなり複雑になることなどを考えあわせれば、一般の暗キヨ排水の問題においては、暗キヨ間隔  $S$  を考慮する必要はほとんどなく、したがって (1-40) 式を用いれば十分正確な結果を得ることができるものと考えられる。

Table 1-5 第Ⅰ層における浸透量  
 $Q_1/k_1 \Delta H_1$  の変化

$b/d_1 \backslash S/d_1$	5	10	15	20	$\infty$
0.5	1.345	1.346	1.347	1.347	1.347
1	1.872	1.874	1.875	1.876	1.876
2	2.868	2.876	2.879	2.880	2.880
3	3.830	3.868	3.876	3.879	3.880

#### (2) 第Ⅱ層における場合

第Ⅱ層における解析結果 (1-41) 式は暗キヨ間隔  $S$  および不透層の深さ  $\ell$  に関係しないことは明らかであるが、第Ⅱ層における解析では  $S$  および  $d_4$  をともに無限大であると仮定しているので、(1-42) 式の妥当性については検討を加えなければならない。

$S$  および  $d_4$  を考慮した場合には、Fig. 1-30 において Schwarz - Christoffel 変換を用いれば、 $z$  平面は次式によって  $\zeta$  平面の上半平

面に等角写像される。

$$z = c_1 \int \frac{d\zeta}{\sqrt{(\zeta^2 - 1)(\zeta^2 - m_1^2)}} + c_2 \quad (1-47)$$

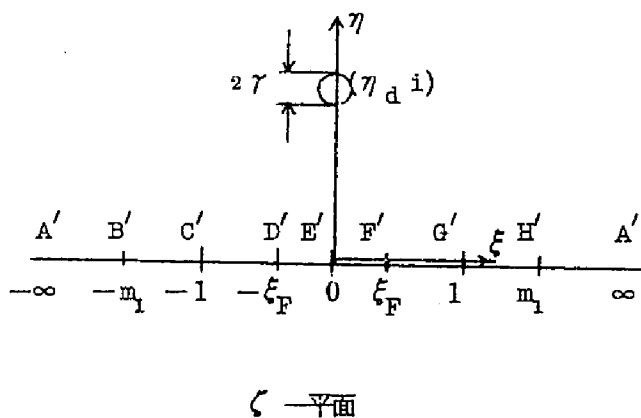
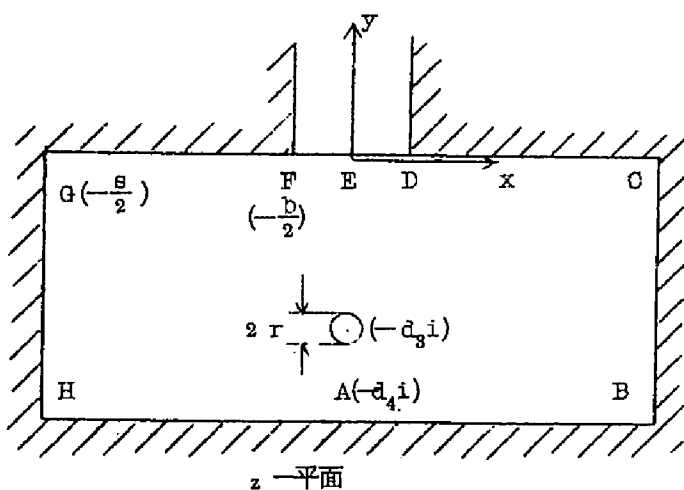


Fig. 1-30 第Ⅲ層における Schwarz -

Christoffel 変換

$k_1^* = 1/m_1$ とおき、定数を決定すれば、

$$z = -\frac{d_4}{K'_1} \int_0^{\zeta} \frac{d\zeta}{\sqrt{(1-\zeta^2)(1-k_1^{*2}\zeta^2)}} \quad (1-48)$$

G点においては  $z = (-S/2, 0)$ ,  $\zeta = (1, 0)$  であるから

$$-\frac{S}{2} = -\frac{d_4}{K'_1} \cdot K_1 \quad (1-49)$$

したがって

$$\frac{K'_1}{K_1} = \frac{2d_4}{S} \quad (1-50)$$

ここで、 $K_1$ ,  $K'_1$  はそれぞれ  $k_1^*$  および  $k_1^{*'} = \sqrt{1-k_1^{*2}}$  を母数とする。

第一種完全長円積分であり、(1-50)式によって  $K_1$ ,  $K'_1$  および  $k_1^*$ ,  $k_1^{*'}$  を求めることができる。

一方、写像関数(1-48)式は Jacobi の長円関数を使えばつぎのように表わされる。

$$\zeta = \operatorname{sn}\left(-\frac{K'_1 z}{d_4}, k_1^*\right) \quad (1-51)$$

暗キヨの中心点  $z = (0, -d_3 i)$  においては、

$$\begin{aligned} \zeta_d = \xi_d + i \eta_d &= \operatorname{sn}\left(\frac{K'_1 d_3 i}{d_4}, k_1^*\right) \\ &= i \cdot \frac{\operatorname{sn}\left(\frac{K'_1 d_3}{d_4}, k_1^{*'}\right)}{\operatorname{cn}\left(\frac{K'_1 d_3}{d_4}, k_1^{*'}\right)} \end{aligned} \quad (1-52)$$

故に

$$\left. \begin{aligned} \xi_d &= 0 \\ \eta_d &= \frac{\operatorname{sn}\left(\frac{K'_1 d_3}{d_4}, \frac{k_1^*}{k_1}\right)}{\operatorname{cn}\left(\frac{K'_1 d_3}{d_4}, \frac{k_1^*}{k_1}\right)} \end{aligned} \right\} \quad (1-53)$$

F点においては  $z = (-b/2, 0)$  であるから

$$\zeta_F = \xi_F + i \eta_F = \operatorname{sn}\left(\frac{K'_1 b}{2d_4}, k_1^*\right) \quad (1-54)$$

故に

$$\left. \begin{aligned} \xi_F &= \operatorname{sn}\left(\frac{K'_1 b}{2d_4}, k_1^*\right) \\ \eta_F &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-55)$$

また、暗キ  $\equiv$  半径  $r$  は他の項に比べて小さいと考えられるから、近似的に  $\gamma = r \left[ d\zeta/dz \right]_{z=-d_3 i}$  とおくと

$$\begin{aligned} \gamma &= r \left[ \frac{d}{dz} \operatorname{sn}\left(-\frac{K'_1 z}{d_4}, k_1^*\right) \right]_{z=-d_3 i} \\ &= \frac{K'_1 r}{d_4} \operatorname{cn}\left(\frac{K'_1 d_3 i}{d_4}, k_1^*\right) \cdot \operatorname{dn}\left(\frac{K'_1 d_3 i}{d_4}, k_1^*\right) \\ &= \frac{K'_1 r}{d_4} \sqrt{(1+\eta_d^2)(1+k_1^{*2}\eta_d^2)} \end{aligned} \quad (1-56)$$

となる。

このようにすれば、 $\zeta$  平面においては長さ  $2\xi_F$  の line source の垂直二等分線上  $\eta_d$  なる距離にある半径  $r$  の井戸への流れの問題に帰着

されるから、(1-42)式においてそれぞれ

$d_3$  のかわりに

$$\eta_d = \frac{\operatorname{sn}\left(\frac{K'_1 d_3}{d_4}, k_1^{*'}\right)}{\operatorname{cn}\left(\frac{K'_1 d_3}{d_4}, k_1^{*'}\right)}$$

$b$  のかわりに

$$2\xi_F = 2\operatorname{sn}\left(\frac{K'_1 b}{2d_4}, k_1^{*'}\right)$$

$r$  のかわりに

$$r = \frac{K'_1 r}{d_4} \sqrt{(1+\eta_d^2)(1+k_1^{*2}\eta_d^2)}$$

(1-57)

を代入すれば、 $S$  および  $d_4$  を有限であると考えた場合の排水量を求めることができる。

以上の解析において、とくに  $S$  が  $d_4$  に比べて大きく無限大と仮定できる場合には、(1-50)式は  $K'_1/K_1 = 0$  となり、したがって、 $k_1^{*} = 1$  ,  $k_1^{*'} = 0$  となる。この時は  $K'_1 = \pi/2$  であるから、(1-57)式はつぎのように簡単になる。

$$\eta_d = \tan \frac{\pi d_3}{2d_4}$$

$$2\xi_F = 2 \tanh \frac{\pi b}{4d_4}$$

$$r = \frac{\pi r}{2d_4} \cdot \frac{1}{\cos^2 \frac{\pi d_3}{2d_4}}$$

(1-58)

いま、 $S$ および $d_4$ のいろいろな値に対して(1-57)式を計算し、(1-42)式を用いて第Ⅲ層における浸透量 $Q_3/k_3 \Delta H_3$ の値を求めると、Table 1-6のようになる。

その結果、一般に $Q_3/k_3 \Delta H_3$ は $S$ の変化によってはほとんど影響を受けることはなく、また $d_4$ についても、暗キヨが不透層にごく接近して存在しない限り、 $d_4$ の変化にはあまり影響を受けないことがわかる。

Table 1-6 第Ⅲ層における浸透量 $Q_3/k_3 \Delta H_3$   
の変化( $r/d_3=0.05$  ,  $b/d_3=0.5$ )

$S/d_3 \backslash d_4/d_3$	1.25	1.5	2.0	3.0	$\infty$
5	0.893	0.938	0.956	0.960	0.961
10	0.898	0.939	0.957	0.961	0.962
20	0.899	0.940	0.958	0.962	0.963
$\infty$	0.901	0.940	0.958	0.962	0.963

したがって以上の結果から判断して、暗キヨ間隔 $S$ および不透層の深さ $d_4$ を無限大と仮定して求めた(1-45)式あるいは(1-46)式を用いて暗キヨ排水量を求めても、一般の場合には十分正確な結果を得ることができるものと考えられる。

暗キヨが不透層の直上にごく接近して存在するような場合には、(1-58)式によって修正した値を(1-45)式あるいは(1-46)式に代入すればより正確な暗キヨ排水量を求めることができる。

### 3. Resistance Network による実験

#### (1) 実験の目的および方法



以上に述べた暗キヨ排水量の算定式(1-45)式および(1-46)式は、第Ⅰ層、第Ⅱ層、第Ⅲ層のそれぞれの境界面を等ポテンシャル面と仮定して導かれたものであるから、この仮定の妥当性を確かめるために Resistance Network を用いて以下のような実験を行なった。

#### 〔実験Ⅰ〕

各層の厚さをそれぞれ  $d_1 = 25\text{ cm}$  ,  $d_2 = 25\text{ cm}$  ,  $d_3 = 75\text{ cm}$  とし、暗キヨ間隔  $S$  は  $5\text{ m}$ 、暗キヨ半径  $r$  は  $2.5\text{ cm}$ 、透水係数は  $k_1 = k_2 = k_3 = k$  とした。

そして暗キヨの深さ  $d$  が  $1\text{ m}$  および  $0.75\text{ m}$  の2つの場合について、埋めもどし部の幅  $b$  を  $12.5\text{ cm}$ 、 $25\text{ cm}$ 、 $37.5\text{ cm}$  および  $50\text{ cm}$  といろいろに変化させて暗キヨ排水量  $Q/k \Delta H$  を測定した。

#### 〔実験Ⅱ〕

一般に暗キヨ埋設溝を埋めもどす場合には、種々の理由から、従来の土層を混合せず、各層ごとに埋めもどしを行なうのが普通であるから、このような場合は当然、各層の透水係数もそれぞれ異なっているものと考えられる。このような場合においても(1-45)式を用いれば暗キヨ排水量を計算することができるが、これに対しても以下のような実験を行ない、(1-45)式の妥当性について検討を加えた。

すなわち、埋めもどし部の幅  $b$  を  $25\text{ cm}$  とし、暗キヨ深さ  $d$  が  $1\text{ m}$  および  $0.75\text{ m}$  の2つの場合について、透水係数の比  $k_1/k_2$  をいろいろに変化させて、暗キヨ排水量  $Q/k_1 \Delta H$  を求めた。なおこの場合、 $k_1 = k_3$  とし、その他の諸条件は〔実験Ⅰ〕の場合と同様である。

### (2) 実験結果とその検討

〔実験Ⅰ〕の結果を Fig. 1-31 に、また〔実験Ⅱ〕の結果を Fig. 1-32 に示す。これらの図には、(1-45)式あるいは(1-46)式による計算値も曲線で示してあるが、これらの計算値は全般的に実験値とよく一致していることがわかる。

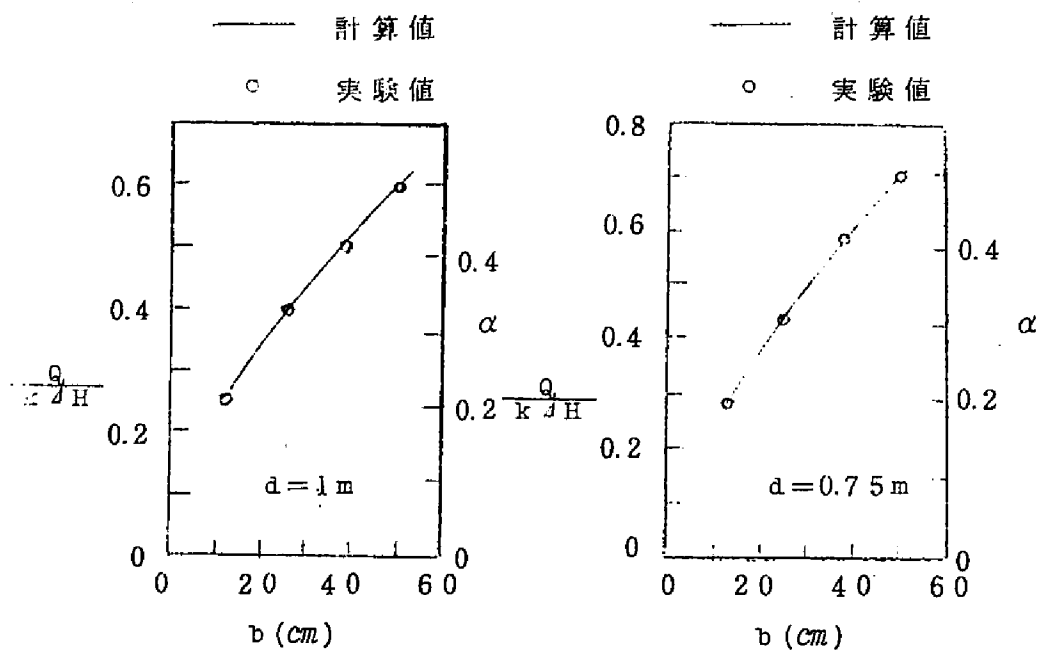


Fig. 1 - 31 〔実験Ⅰ〕の結果

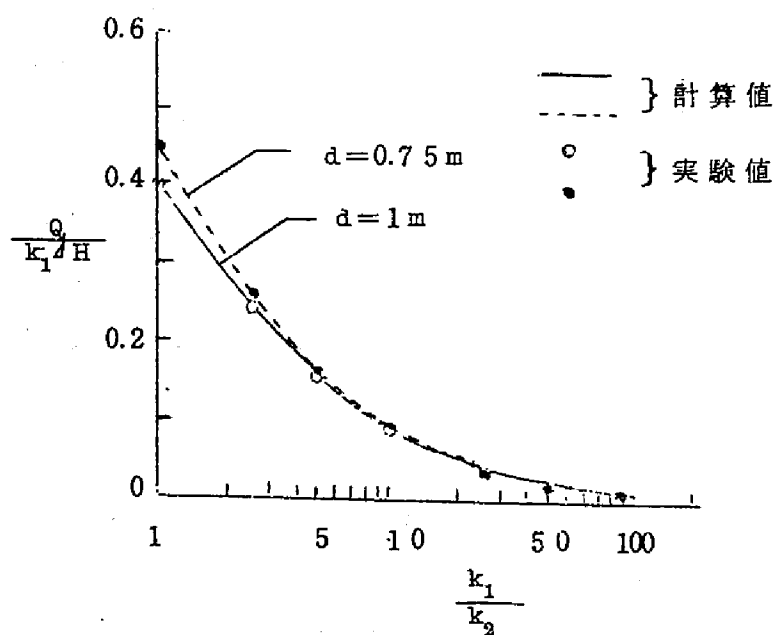


Fig. 1 - 32 〔実験Ⅱ〕の結果

したがって、(1-45)式あるいは(1-46)式は、Fig.1-28に示されているような条件のもとでの暗キヨ排水量を求める算定式として十分に満足すべき結果を与えるものであることが確かめられた。

また、Fig.1-31をみれば明らかなように、暗キヨ排水量は埋めもどし部の幅 $b$ の増加につれてほぼ直線的に増加していることがわかる。

図中にはまた、埋めもどし部の排水効果を表わす係数 $\alpha$ をも目盛っておいた。この係数 $\alpha$ は、前述したように埋めもどし部を通して流れる排水量の割合を表わすものであり、これをみても、埋めもどし部の排水効果がいかに大きなものであるかが明らかである。

また、それが埋めもどし部の幅 $b$ に大きく影響されるものであることがわかる。

#### 4. 計算図表

以上に述べたことから明らかなように、Fig.1-28に示されているような条件のもとでの暗キヨ排水量は(1-45)式あるいは(1-46)式を用いれば実用上十分に満足すべき結果を得ることができるが、これらの式は計算がかなり繁雑になるので、計算に便利のように計算図表を作成したのがFig.1-33である。

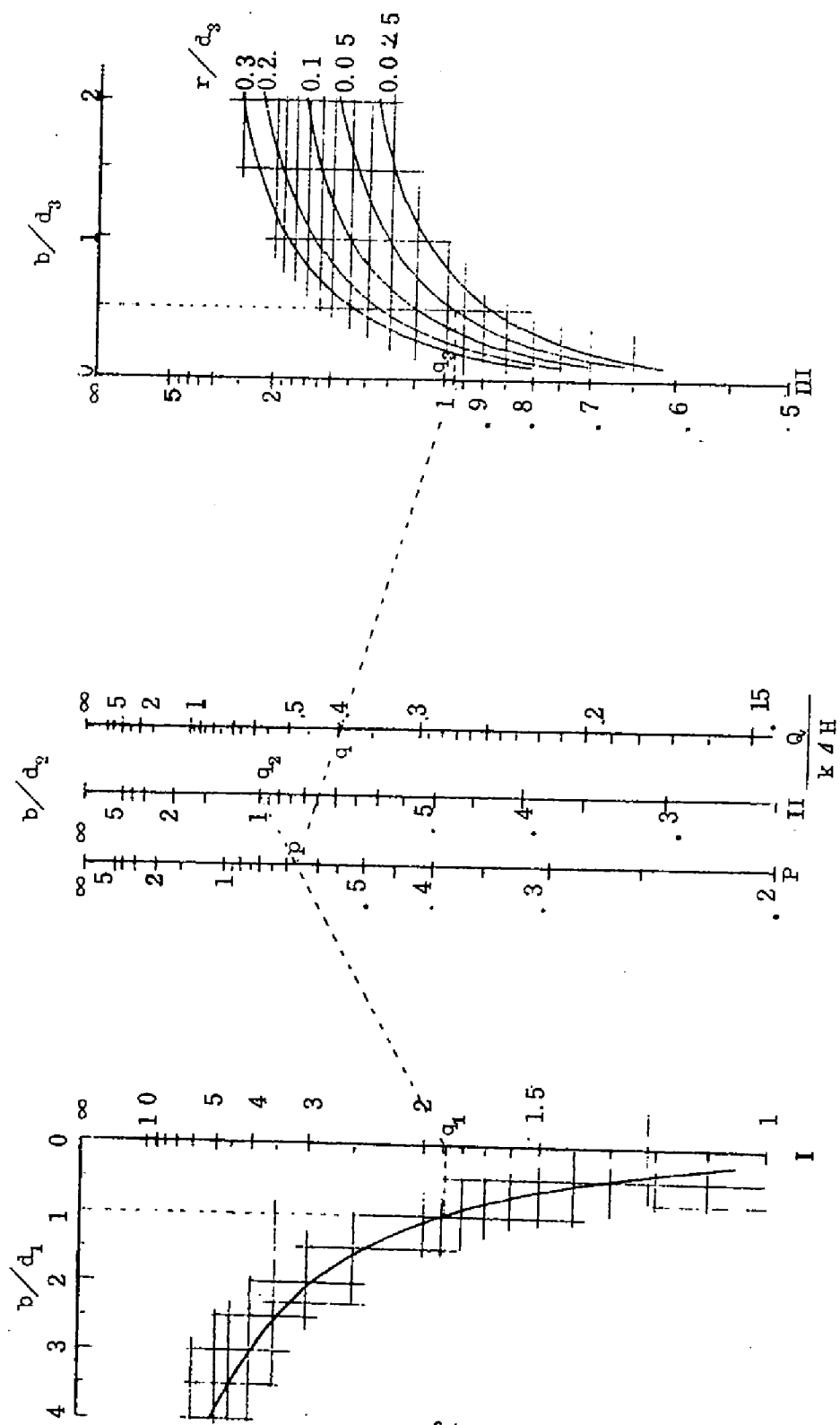


Fig. 1 — 33 計算図表

この計算図表の使用法はつぎのとおりである。

各層の透水係数が等しく、 $k_1 = k_2 = k_3 = k$  の場合には、まず左端のグラフで第Ⅰ層における  $b/d_1$  の値に対するⅠ軸上の点を  $q_1$  とすると、これが第Ⅰ層における浸透量  $Q_1/k \Delta H_1$  を与える。

つぎにⅡ軸上において第Ⅱ層の  $b/d_2$  の値に対する点を  $q_2$  とし、 $q_1$ 、 $q_2$  を結んだ直線と P 軸との交点を  $p$  とする。つぎに、右端のグラフにおいて、第Ⅲ層の  $b/d_3$  と  $r/d_3$  の値に対応するⅢ軸上の点を  $q_3$  とすれば、これが  $Q_3/k \Delta H_3$  の値を与えるものであり、 $p$  と  $q_3$  とを結んだ直線と  $Q/k \Delta H$  軸との交点を  $q$  とすれば、 $q$  が求める暗キ  $\equiv$  排水量  $Q/k \Delta H$  の値を与えるものである。

図中には一例として、 $d_1 = d_2 = 25 \text{ cm}$ 、 $d_3 = 50 \text{ cm}$ 、 $b = 25 \text{ cm}$ 、 $r = 2.5 \text{ cm}$  の場合を点線で示しておいた。

透水係数  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  がそれぞれ異なっている場合には、(1-45) 式から考察すれば明らかなように、例えば  $k_3$  を基準にとって、Ⅰ軸、Ⅱ軸における値をそれぞれ  $k_1/k_3$ 、 $k_2/k_3$  倍した値を改めて  $q_1$ 、 $q_2$  点とすれば、前と同様にして暗キ  $\equiv$  排水量  $Q/k_3 \Delta H$  を求めることができる。

## 第4章 総 括

この研究は、成層土壌中における暗キヨ排水の基礎的な機構を明らかにするために実験的に研究を行ない、検討を加えたものである。

まず、この研究のための手段として、Resistance Network を選定してその試作を行なった。

Resistance Network を暗キヨ排水の問題に適用する場合には、暗キヨ管壁における境界条件のとり方が問題となるが、ここでは流れは暗キヨの中心に向かって流れ、等ポテンシャル線は暗キヨを中心とする同心円であると考えて境界条件の算定法を導いた。

そして、暗キヨ排水量および土壌中のポテンシャル分布について詳細な実験を行なった結果、この方法を用いれば、ここで試作した network の精度は実用上十分に満足すべきものであることが明らかにされた。

つぎに、成層土壌中における暗キヨ排水の問題、とくに暗キヨ埋めもどし部の排水に及ぼす影響について Resistance Network を用いて実験的に研究を行なった結果、つぎのようなことを明らかにすることができた。

すなわち、暗キヨへの流れは暗キヨ近傍に集中するから、暗キヨ近傍の成層状態が排水に最も大きく影響すること、したがって暗キヨ埋めもどし部の排水効果は大きいことが明らかにされた。

つぎに、これらの実験結果に基づいて、暗キヨ排水量の算定式について考察した。とくに暗キヨ埋めもどし部の排水効果を表わす係数として(1-25)式のような $\alpha$ を定義すれば、 $\alpha$ は透水係数の比 $k_1/k_2$ の値のいかにかわらず一定値をとり、暗キヨ排水量は(1-26)式のような簡単な式によって表わすことができることを示した。

係数 $\alpha$ は透水係数の比 $k_1/k_2$ には関係しない値であるから、 $k_1/k_2$ の任意

の値について求めておけばよい。ここでは  $k_1/k_2 = \infty$  の場合、すなわち耕盤の透水係数  $k_2$  が 0 の場合を考え、浸透水は暗キヨ埋めもどし部のみを通して流れると仮定した場合の暗キヨ排水量について、等角写像の理論を用いてその算定式を導いた。

解析にあたっては暗キヨ間隔および不透層の深さを無限大と仮定したが、この仮定についても検討を加えた結果、一般の場合には十分に満足すべきものであることが明らかにされた。

さらに、この算定式の妥当性を確かめるために、Resistance Network を用いて実験を行なった結果、計算値と実験値とはよく一致するものであることを明らかにした。また、計算に便利なように計算図表を作成した。

以上のようにして、耕盤の透水係数を 0 と考えた場合の暗キヨ排水量を求めることができれば、これから係数  $\alpha$  を求めて、暗キヨ埋めもどし部の排水効果を考慮した一般の場合の排水量を決定することができる。

## 第 2 編 非 定 常 排 水



## 第 1 章      総      論

非定常暗キ ≡ 排水の理論は複雑な問題がからみあって、その解析は定常状態の場合に比較してはるかに困難であるが、それだけに暗キ ≡ 排水の設計にあたっての重要な研究課題として解明しなければならない問題点も多い。

非定常排水の問題については従来からもいろいろな仮定や近似に基づいた解析法が試みられているが、これらはそれぞれに一長一短を有しており、いまだ一般に広く適用しうる合理的な方法が確立されているとはいえない現状である。

非定常暗キ ≡ 排水に関する従来の研究は、降雨停止後の地下水面の低下を取り扱ったものがほとんどである。

以下に従来の研究成果の概要とその問題点について述べる。

まず、Childs<sup>1) 2)</sup> は、排水の過程を微小時間毎に分割し、各々の微小時間内では流れは近似的に定常であると考えて、電気アナログの方法によって一連の実験的研究を行なっている。また、Kirkham and Gaskell<sup>3)</sup> および Isherwood<sup>4)</sup> らは同様な考え方から、微小時間内では流れは Laplace 方程式に従うものとして、relaxation によってこれを解析している。

理論的に非定常排水の条件に基づく暗キ ≡ 間隔公式を導いたものとしては、まずつぎの Glover の研究があげられる。<sup>5)</sup>

$$\frac{y}{y_0} = \frac{4}{\pi} \exp \left( - \frac{k}{f} \cdot \frac{\bar{D} \pi^2}{S^2} t \right) \quad (2-1)$$

ただし、 $k$  は土壌の透水係数、 $f$  は drainable porosity、 $t$  は時間であり、 $\bar{D}$  は平均地下水流動深さで、

$$\bar{D} = h + \frac{1}{2} y_0 \quad (2-2)$$

で求められる。式中の他の記号は Fig. 2-1 に示すとおりである。

Glover の式 (2-1) は、Dupuit-Forchheimer の水平流の仮定と連続の条件とから得られる非線型の偏微分方程式を、平均地下水流動深さ  $\bar{D} = \text{const.}$  の仮定を用いて線型の拡散方程式になおして導かれたもので、そ

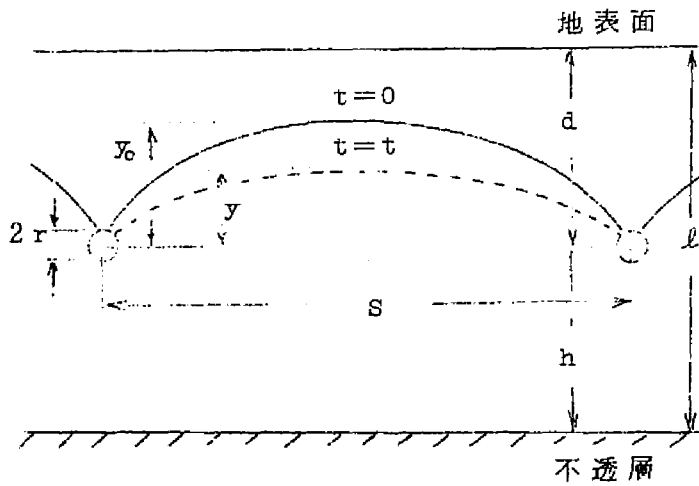


Fig. 2-1 暗キ井間隔公式記号図

の適合性についてはいろいろと検討が行なわれている。<sup>6)</sup> すなわち、Fig. 2-1において  $h \ll S$  でなければ暗キ井周辺における流れの収束のために水平流の仮定が成り立たなくなり、また  $y_0 \ll h$  でなければ  $\bar{D} = \text{const.}$  の仮定が不合理となるために、Glover の式を適用するにあたっては  $y_0 \ll h \ll S$  の条件を十分に吟味しなければならない。

Brooks<sup>7)</sup> は非線型の偏微分方程式に対して  $\bar{D} = \text{const.}$  の仮定を用いることなく、 $y_0 \ll h$  でない場合にも適用しうるように解析を進めた。そして、Glover の式は  $y_0 / \bar{D} \ll 1$  の場合には十分に適用できることを示した。しかしながら、Brooks の解析においても水平流の仮定が用いられているために、 $h \ll S$  の条件が満足されなければならない。Brooks は Isherwood による relaxation の結果と比較した結果、 $S/h > 25$  であれば両者はよく

一致すると述べている。

van Schilfgaard<sup>8)</sup> もまた水平流の仮定に基づいて非定常暗キヨ排水理論を導いているが、その中で、暗キヨ周辺の流線の収束による影響をも考慮すべきだとして、Hooghoudt の equivalent depth の概念を導入することを提唱している。また、Moody<sup>9)</sup> は水平流の仮定に基づいた非線型偏微分方程式をそのまま relaxation によって解き、その結果をノモグラフにして示している。

以上は Dupuit - Forchheimer の仮定に基づいた理論であるが、それに対して Hammad<sup>10)</sup>, Kirkham<sup>11)</sup> はポテンシャル理論によって導かれた定常状態における地下水面形の理論式を時間に関して積分することによって、非定常排水についての公式を得ている。しかしながら、これらの理論においても定常排水の場合と同様に、その誘導過程においていろいろな仮定を行なっているので、これらの式の適用範囲については十分注意する必要がある。

Talsma and Haskew<sup>12)</sup> および Dumm<sup>13)</sup> は現地試験の結果から、一般に、Glover の式 (2-1) において、暗キヨ周辺における流線の収束を考慮に入れて、Hooghoudt の equivalent depth を適用すれば比較的よく適合するものであると述べている。Glover の式は他の式に比べて形が簡単であり、実用にも適していると考えられる。

以上は降雨停止後の地下水面の低下状況を取り扱ったものであるが、その他に Mansland<sup>14)</sup> は、Dupuit - Forchheimer の仮定に基づいて降雨が間歇的に降る場合について取り扱い、また Dagan<sup>15)</sup> は降雨強度が変化する場合の地下水面の変動についてポテンシャル理論を用いて研究を行なっている。

以上に述べた非定常暗キヨ排水についての理論では、すべて drainable porosity (あるいは specific yield)  $f$  が一定であると仮定されている。すなわち、単位長さあたりの地下水面の低下に伴って、直ちに、単位面積の土壌からある一定量の水分 ( $f$ ) が排水され则认为られている。

しかしながら、Childs<sup>17)</sup>, Taylor<sup>18)</sup> らによると、地下水面より上の部分の

土壌水分の分布状態から、drainable porosityとは必ずしも一定値を示すものではなく、地下水面の深さおよびその降下速度等の関数として複雑に変化するものであるといわれている。しかし、その理論的取り扱い是非常に困難で、いまだ十分に明らかにされていない問題点も多く、非定常暗キ≡排水の理論に取り入れられるまでには至っていない。

また、これらの研究はすべて均質土壌に関するものであり、わが国の水田で一般にみられるような成層状態の土壌については、ほとんど研究がなされていない。したがって、成層土壌における非定常暗キ≡排水について、その特徴と問題点を明らかにし、合理的な暗キ≡排水の設計について考察を加えることが必要であると考えらる。

わが国の水田において、能率のよい機械化営農を推進するためには、適切な排水を行なって地耐力の増強を図ることが必要とされている。すなわち、大型機械の導入にあたっては、地表面タン水の排水と同時にすみやかに地中の過剰水を排除し、地下水位をある所定の深さにまで低下しなければならないといわれている。そのためには合理的な暗キ≡排水の実施が必要であり、その設計にあたっては地表面タン水を落水した後の非定常排水も重要な基本条件のひとつとして考慮されなければならない。

したがって、第2編では、地表面タン水落水後の非定常暗キ≡排水について基礎的な研究を行なうとともに、従来のいくつかの暗キ≡排水理論の適用性について比較考察を加えることにする。

## 第 2 章 非定常排水と Resistance— Capacitance Network<sup>32)</sup>

### I. 非定常排水について

前章で述べたように、従来の非定常暗キ  $\alpha$  排水の理論においては、まず地下水面というものを考慮して、この地下水面より下の部分の流れのみを考えさらに drainable porosity (あるいは specific yield)  $f$  を一定と仮定して理論式が導かれ、暗キ  $\alpha$  の深さおよび間隔が決定されている。

ところが、 $f$  は必ずしも一定値を示すものではなく、地下水面の深さおよびその降下速度等の関数として複雑に変化するものであるといわれているがその数学的取り扱い是非常に困難で、いまだ十分に明らかにされていない問題点も多い。

また、地下水面の上には毛管帯が存在しており、ここでは飽和に近い状態が保たれているのであるが、Luthin and Miller<sup>19)</sup> および Luthin and Worstell<sup>20)</sup> らは、実験の結果から、地下水面とはただ単に圧力が 0 なる面というだけであり、毛管帯の部分においても水は地下水面以下の部分と連続した流れの状態を示していることを明らかにし、非定常排水の理論においては毛管帯の部分の流れをも考慮に入れた解析が必要であると述べている。実際、一般の暗キ  $\alpha$  排水問題においては、毛管帯の大きさは地下水面以下の流れの領域に対して無視しえないほど大きい場合が多いので、毛管帯の取扱いは重要な問題であると考えられる。

以上のような観点から、Day and Luthin<sup>21)</sup> は鉛直排水の問題につぎの Richards 式を適用して、その数値計算を行なっている。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = f(k, \theta, H) \quad (2-3)$$

ただし、 $\theta$  は体積含水率、 $k$  は透水係数、 $H$  はポテンシャル、 $t$  は時間である。

(2-3) 式において、 $k$  は  $\theta$  の関数として複雑に変化するために (2-3) 式は非線型となり、その解析は非常に困難である。最近では電子計算機の発達によって (2-3) 式の数値解析も比較的容易になってきたが、<sup>22) 23) 24)</sup> 境界条件が複雑な場合や土壌が成層状態をなしている場合など複雑な暗キヨ排水の問題についてはいまだ一般的な解法とはなっていないようである。

これに対して Gardner<sup>25)</sup> および Fujioka and Kitamura<sup>26)</sup> らは、(2-3) 式を解析的に解くために平均拡散係数  $D$  ( $D = k \cdot \partial H / \partial \theta$ ) を定義し、それを一定と仮定して、(2-3) 式をつぎのような線型の拡散方程式になおして、鉛直排水についての解析を行ない、実験結果とよく一致することを示した。

$$\frac{\partial H}{\partial t} = D \nabla^2 H \quad (2-4)$$

実際の水田においては、複雑な土壌構造をもち決して一様なものではないが、とくに暗キヨ排水を必要とする粘質土壌水田においては一般に毛管帯の境界は明確ではなく、土壌水分の分布状態も地下水面からの高さに従って徐々に減少しており、近似的に直線的分布を示すと考えられる場合が多い。このような土壌状態における非定常排水の解析にあたっては、 $f = \text{const.}$  の仮定は妥当なものとは考えられず、むしろ  $D = \text{const.}$  の仮定を用いた拡散方程式 (2-4) 式を適用する方が実情に則した合理的な方法であると考えられる。

## II. Resistance-Capacitance Network について

### 1. R - C Network の特徴と原理

以上に述べたように、非定常排水の問題は拡散方程式 (2-4) 式に適当な境界条件と初期条件を適用して解けばよいのであるが、境界条件の簡単な特別の場合を除いては (2-4) 式を理論的に解析することは非常に困難である。

したがってここでは、取り扱いの比較的簡単な電気アナログの方法によって実験的に解くことを考え、Resistance - Capacitance Network (以下は R - C Network と略称する) を試作した。

R - C Network とは、第1編で述べた Resistance Network の各節点にそれぞれコンデンサを連結しただけのもので、比較的簡単な操作によって精度のよい結果を得ることができるものであり、境界条件が複雑な場合や土壌が成層状態をなしている場合の浸透流の解析には有用な手段であると考えられる。

R - C Network の基礎原理を簡単に述べるとつぎのようである。<sup>27)</sup> 簡単のために2次元の流れの領域について考え、Fig. 2-2 に示すように  $x, y$  軸に平行に間隔  $s$  の正方形格子を組む。そして (2-4) 式の右辺を差分方程式に書きなおして整理するとつぎのような式を得る。

$$\left(\frac{\partial H}{\partial t}\right)_0 = \frac{D}{s^2} [H_1 + H_2 + H_3 + H_4 - 4H_0] \quad (2-5)$$

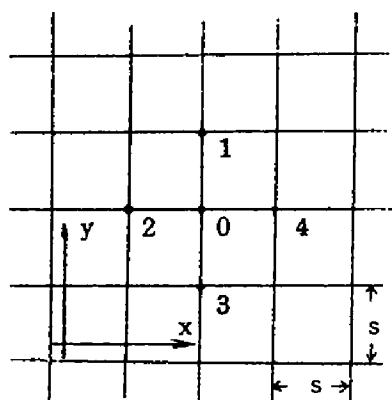


Fig. 2-2 差 分 格 子

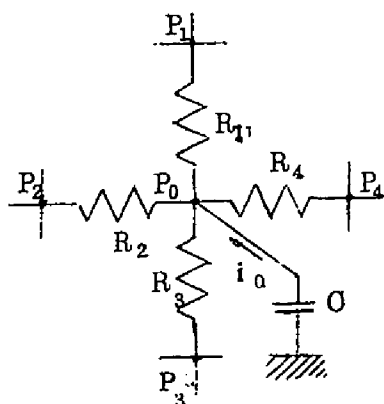


Fig. 2-3 R-C Network 原理図

ここで、添字はFig. 2-2に示す各節点における値を示すものである。

つぎに、Fig. 2-3に示すようなnetworkの一部を考え、周辺の4節点から中央の節点 $P_0$ へ流れる電流の出入を考えれば、Ohmの法則とKirchhoffの法則とから

$$\frac{V_1 - V_0}{R_1} + \frac{V_2 - V_0}{R_2} + \frac{V_3 - V_0}{R_3} + \frac{V_4 - V_0}{R_4} = -i_0 \quad (2-6)$$

ただし、 $V_i$ は電位、 $R_i$ は電気抵抗値、 $i_0$ はコンデンサCから節点 $P_0$ へ流れる電流の強さであり、添字は各節点における値を示す。土壌が均質・等方性であるとすれば、 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ となり、また

$$i_0 = -C \left( \frac{\partial V}{\partial t_n} \right)_0 \quad (2-7)$$



であるから、(2-6)式はつぎのようになる。

$$\left(\frac{\partial V}{\partial t_a}\right)_0 = \frac{1}{RC} [V_1 + V_2 + V_3 + V_4 - 4V_0] \quad (2-8)$$

ここで、 $t_a$ はアナログにおける時間である。

(2-5)式と(2-8)式を比較すれば明らかなように、これらは全く相似形をなしているから、Fig. 2-3のようなR-C Networkを組むことによって、(2-4)式を実験的に解くことができることがわかる。

いま、(2-5)式と(2-8)式を比較して、流体系と電気系を、scale factor  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  によってつぎのように対応させることにする。

$$(\text{ポテンシャル}) H = K_1 \cdot V \quad (\text{電位}) \quad (2-9)$$

$$(\text{浸透量}) Q = K_2 \cdot i \quad (\text{電流}) \quad (2-10)$$

$$(\text{時間}) t = K_3 \cdot t_a \quad (\text{時間}) \quad (2-11)$$

土壌の透水係数を  $k$  とすると、Darcy 法則と Ohm の法則の相似性より

$$R = \frac{K_2}{K_1} \cdot \frac{1}{k} \quad (2-12)$$

また、(2-5)式と(2-8)式の相似性より

$$C = \frac{1}{K_3} \cdot \frac{s^2}{RD} = \frac{K_1}{K_2 K_3} \cdot \frac{k s^2}{D} \quad (2-13)$$

(2-12)式と(2-13)式によって network に使用すべき  $R$  と  $C$  の値が求められる。

## 2. R-C Network の製作

ここで試作した R-C Network は、第 1 編で述べた Resistance Network の各節点にそれぞれコンデンサを連結しただけのものである。その配線図を示すと Fig. 2-4 のとおりである。

電源としては取り扱いが簡単で、電圧も比較的安定している 3 ボルト乾電池を用い、またコンデンサには MP コンデンサを使用した。

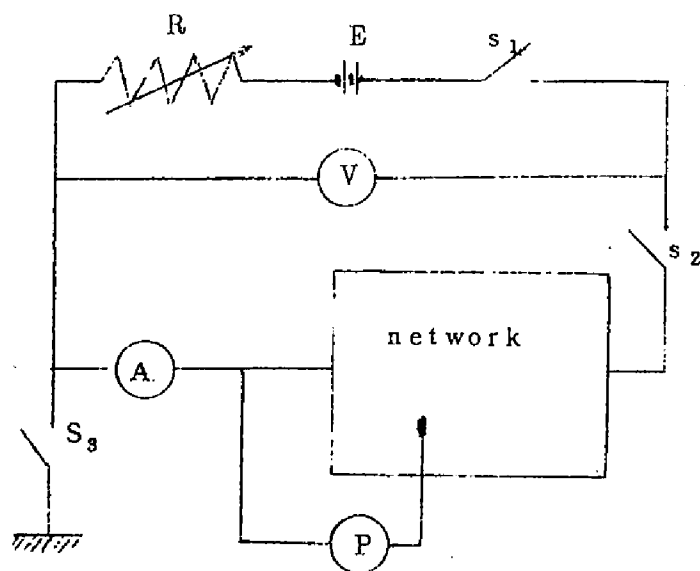


Fig. 2-4 R-C Network 配線図

### 3. 境界条件の設定

実験にあたっては、まず解くべき問題の境界条件に従って、network の抵抗 R およびコンデンサ C を調整しておかなければならない。R の調整については Resistance Network の場合と同様で、第 1 編で述べたとおりである。

以下は C の調整について述べることにする。

#### (1) 不透層面

network のコンデンサに貯えられている電気量は、そのコンデンサ

の支配面積から排水しうる水量を表わすと考えられる。

Fig. 2 - 5 に示されているような不透層面上の節点では、内部の節点に対して支配面積は  $1/2$  であるから、不透層面上の節点に連結するコンデンサの容量  $C_A$  は次式で表わされる。

$$C_A = \frac{1}{2} C_0 \quad (2-14)$$

ただし、 $C_0$  は network の内部の節点に連結されるコンデンサの基準容量である。

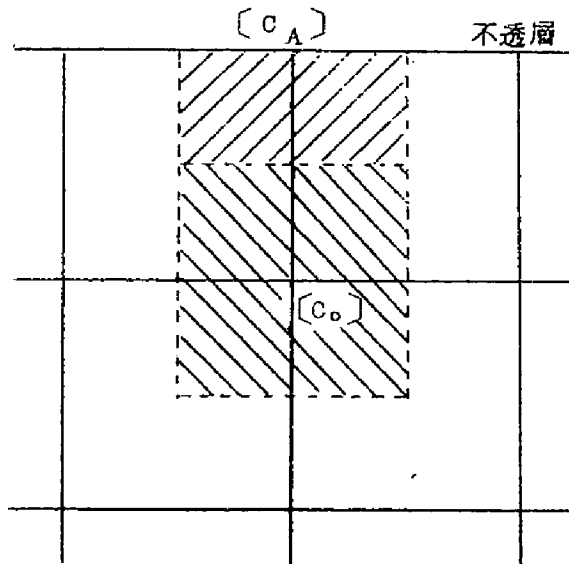


Fig. 2 - 5 不透層面の境界条件

## (2) 成 層 面

Fig. 2 - 6 のように2層の境界面に位置する節点では、Ⅰ層とⅡ層によるそれぞれの容量の和と考えることができるから、それぞれの層の基準容量を  $C_I$  ,  $C_{II}$  とすれば次式で表わされる。

$$C_B = \frac{1}{2} \cdot (C_I + C_{II}) \quad (2-15)$$

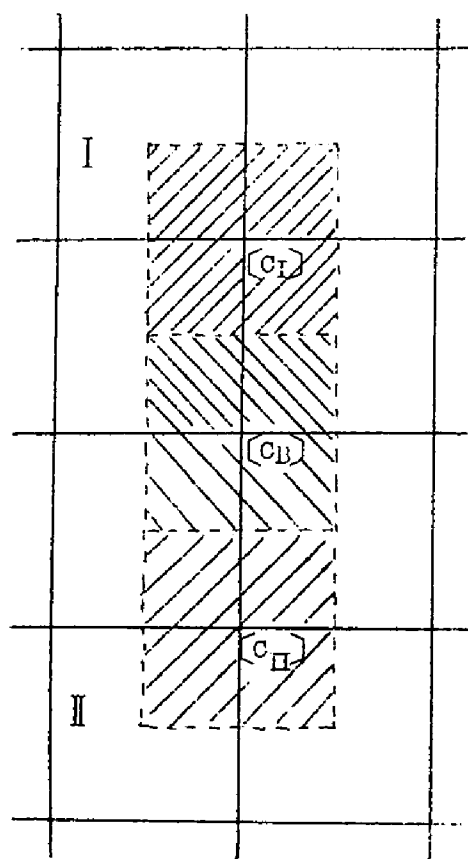


Fig. 2 - 6 成層面の境界条件

(3) networkの分割

Fig. 2 - 7 に示すように、network の一部の net 間隔を  $1/2$  に細かく分割した場合の各節点に連結すべきコンデンサの容量は、それぞれの節点の支配面積を考えることにより、図のようにすればよいことがわかる。

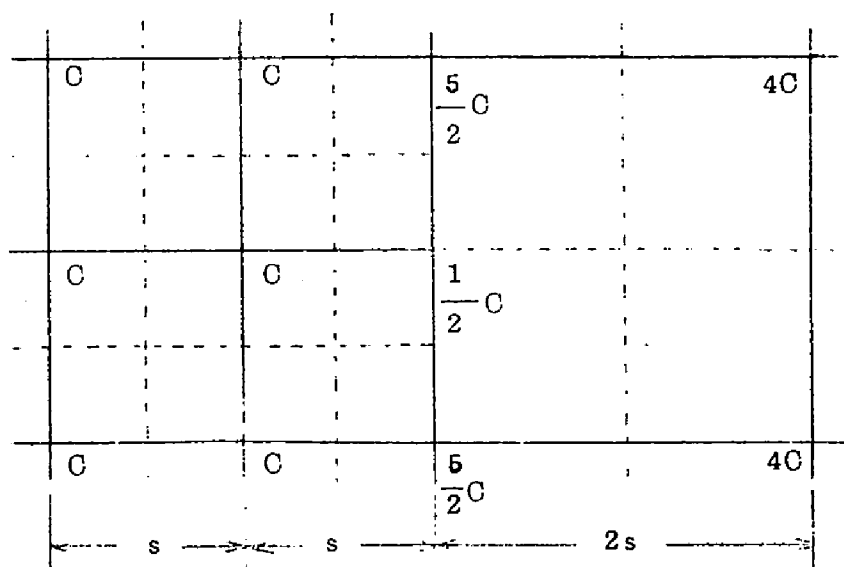


Fig. 2 - 7 network の分割

#### 4. 実験方法

実験は、以上に述べたようにして network の R と C の調整を行なった後、Fig. 2 - 4 に示すスイッチ  $s_1$  ,  $s_2$  ,  $s_3$  をそれぞれ閉じた状態で地表面タン水のある定常状態の場合の測定を行なう。その方法は、Resistance Network の場合と全く同様にすればよい。

その後、電流計 A あるいは電位差計 P に記録計を連結してスイッチ  $s_2$  を切れば、電流  $i$  あるいは電圧  $V$  の時間的变化が記録される。この結果を、(2-9)、(2-10)、(2-11) 式に従って、 $H$  ,  $Q$  ,  $t$  に変換すれば、落水後の土壌中の各点のポテンシャル  $H$  および浸透量  $Q$  の時間的变化を知ることができる。

#### 5. R-C Network の精度の検定

以上のようにして試作した R-C Network の精度を確かめるためにすでに理論解の求められている鉛直排水についてアナログ実験を行ない、その結果を理論解と比較検討した。

すなわち、Fig. 2-8に示されているような地表面タン水のある鉛直土壌柱の下端から排水を行ない、タン水消失後の排水量および土壌柱の各点におけるポテンシャルの時間的变化を測定した。

その結果を理論解と比較するために、無次元化してそれぞれ積算排水量  $[Q/Q_{\infty}]_{ac}$  およびポテンシャル  $H/\Delta H$  で表わし、Fig. 2-9に示した。ただし、時間  $t$  についてはタン水消失時を  $t=0$  とし、無次元化して  $T$  ( $T=D/\ell^2 \cdot t$ ) で表わした。

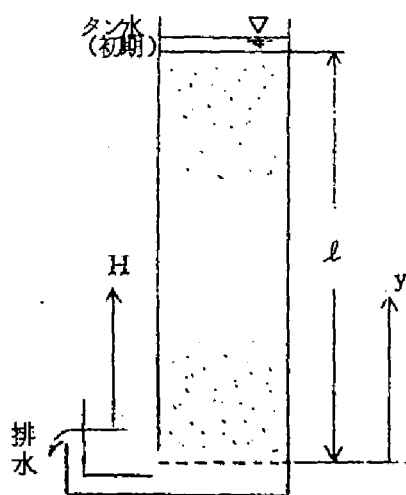


Fig. 2-8 鉛直排水の実験の記号図

また、 $\Delta H$  は時間  $t=0$  における地表面と排水口との間のポテンシャル差であり、 $Q_{\infty}$  は  $t=\infty$  における積算排水量、 $\ell$  は土壌柱の長さである。

このような鉛直排水の理論解として、Fujioka and Kitamura<sup>26)</sup> は土壌柱全体に拡散方程式 (2-4) 式を適用して解析を行ない、つぎのよ

うな結果を得ている。

ポテンシャル分布；

$$\frac{H}{\Delta H} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^2} \exp\left\{-\left(\frac{2m+1}{2}\pi\right)^2 T\right\} \cdot \cos \frac{(2m+1)\pi}{2} \frac{y}{l} \quad (2-16)$$

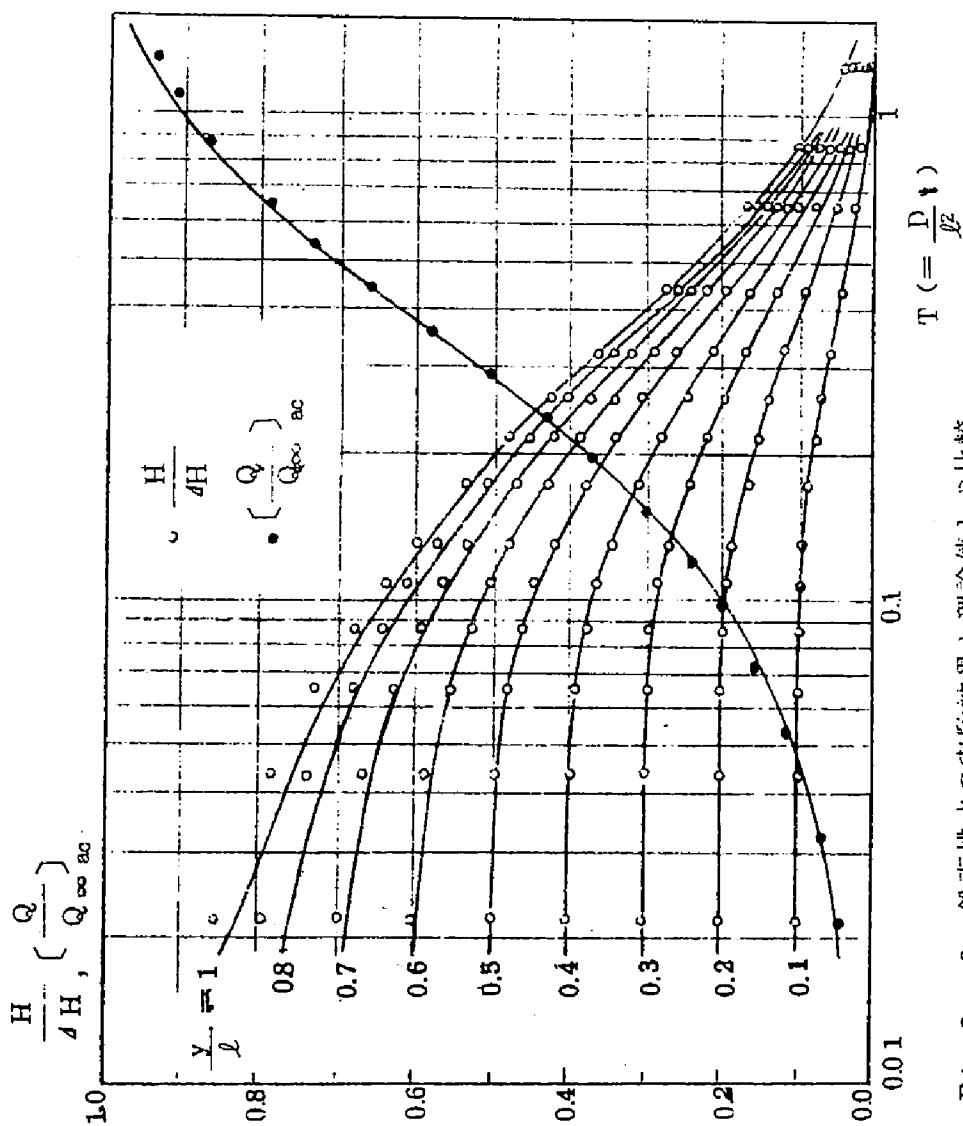


Fig. 2-9 鉛直排水の実験結果と理論値との比較

積算排水量；

$$\left(\frac{Q}{Q_{\infty}}\right)_{nc} = 1 - \frac{32}{\pi^3} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{(2m+1)^3} \exp\left[-\left(\frac{2m+1}{2}\pi\right)^2 T\right] \quad (2-17)$$

(2-16)，(2-17)式による計算結果をも Fig. 2-9 に実線で示してあるが、これらは実験値とよく一致した結果を示している。

したがって、ここで試作した R-C Network は、拡散方程式 (2-4) 式のアナログとして実用上十分に満足すべき精度をもつものであることが確かめられた。

## 6. R-C Network の修正

前述したように、R-C Network は拡散方程式 (2-4) 式を電気アナログによって解くものであるということが出来るが、これを暗キヨ排水の問題に応用する場合には、鉛直排水の場合とは異なっているいろいろな問題点が存在するためにそのまま実験に用いることはできず、network を修正する必要がある。

すなわち、Luthin and worstell<sup>20)</sup>によれば、地下水面より下の部分では水は飽和状態で Laplace 式に従って流れ、地下水面より上での流れは Richards 式によって表わされるといわれている。

したがって、土壌構造の変化や封入空気の影響を無視すれば (2-4) 式に従って排出される水量は一樣ではなく、地下水面からの高さによって変化すると考えられる。地下水面は最終的には暗キヨの高さにまで低下するから、これを R-C Network でアナログする場合には、初期条件として各節点のコンデンサに与えるべき電位差を暗キヨからの高さに比例する



ように調整し、暗キ $\equiv$ から下の部分では0とすればよいことになる。

しかし、この問題は地下水面が時間とともに変動するものであるということが問題をいっそう複雑にしており、厳密に R-C Network で表わすことは非常に困難であるので、ここではつぎのような近似法を考えた。

すなわち、Fig. 2-10 に示すように、暗キ $\equiv$ 間全体を network の格子にそって、地表面から暗キ $\equiv$ 中心線まで達する鉛直な土壌柱に分割して考え、各々の土壌柱から暗キ $\equiv$ を通して排出される水量を一括して、それぞれの土壌柱の地表面に沿う節点のコンデンサに貯えられている電気量で表わすことにする。

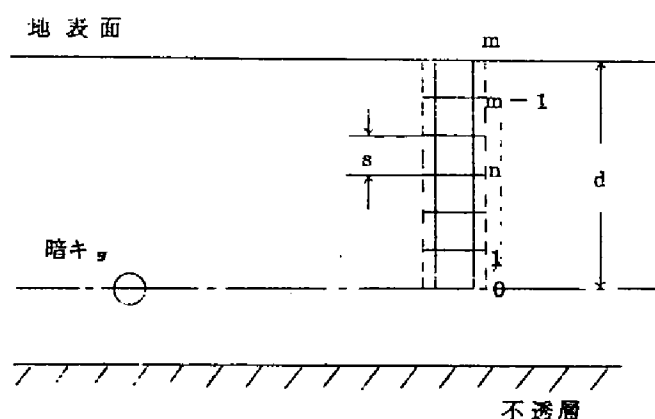


Fig. 2-10 network の修正

一般の暗キ $\equiv$ 排水の問題においては、土壌柱の内部では地表面に近い所ほど排水量が多いと考えられる。さらに、暗キ $\equiv$ の深さに対して暗キ $\equiv$ 間隔が十分に大きいので、このような近似的な方法でも実情をかなりよく表わすことができると考えられ、実用上は十分な解を得ることができるものと思われる。

以上のようにして network を修正する場合に、地表面にその節点に与

えるべきコンデンサの容量  $C^*$  を求める方法を考えよう。

Fig. 2-10 に示されているように、R-C Network において暗キヨ中心線から地表面まで  $m$  個の net に分割されているとし、下から数えて  $n$  番目の節点に与えられているコンデンサの容量を  $C_n$  とすれば、 $C_n$  ( $0 \leq n \leq m$ ) に貯えられている電気量の和と等しい電気量を  $C^*$  に与えればよいのであるから、地表面と暗キヨの間の電位差を  $\Delta V$  とすれば、次式が得られる。

$$C^* \cdot \Delta V = \sum_{n=0}^m C_n \cdot \frac{n}{m} \Delta V \quad (2-18)$$

したがって

$$C^* = \sum_{n=0}^m \frac{n}{m} C_n \quad (2-19)$$

一般に (2-19) 式によって  $C^*$  を求めることができる。

ここでとくに土壌が均質であるとすれば、

$$\begin{aligned} C_n &= \frac{1}{2} C \quad (n=0, m) \\ &= C \quad (1 \leq n \leq m-1) \end{aligned}$$

であるから、(2-19) 式は、

$$C^* = \frac{1}{2} m C = \frac{d}{2s} C \quad (2-20)$$

となる。ただし、 $s$  は net 間隔、 $d$  は暗キヨ深さである。これを (2-13) 式に代入すれば次式を得る。

$$C^* = \frac{1}{K_s} \cdot \frac{d_s}{2RD} \quad (2-21)$$

(2-21)式によって求められた $C^*$ を地表面に沿う節点に与えればよいことになる。

### 第3章 非定常暗キヨ排水の実験<sup>39) 38)</sup>

#### I. 均質土壌における非定常排水

##### 1. 実験の目的および方法

第2章で述べたように、ここで試作した R-C Network はいくつかの仮定や近似に基づいたものであり、厳密な解析法であるとはいえないが、取り扱いが簡便であること、境界条件や成層状態が複雑な場合にも容易に適用できることなどの特徴を有するため非定常暗キヨ排水の解析には有用な手段であると考えられる。

そこで、この R-C Network を用いて、まず均質土壌中に埋設された暗キヨの非定常排水に関する基礎的な特性を明らかにするために、つぎのような実験を行なった。

まず、不透層までの深さが比較的浅い場合として  $\ell = 1.25 \text{ m}$  の場合を考え、暗キヨの深さ  $d$  が  $0.75 \text{ m}$  および  $1 \text{ m}$  の2つの場合について、暗キヨ間隔  $S$  および暗キヨ半径  $r$  をいろいろに変化させて、地表面タン水落水後の暗キヨ排水量  $Q$  および地表面におけるポテンシャル  $H$  の時間的変化を測定した。

また、不透層の深さが比較的深い場合として、 $\ell = 5 \text{ m}$  の場合についても同様の実験を繰り返した。

実験の結果は無次元化して、暗キヨ排水量およびポテンシャルをそれぞれ  $Q/k \Delta H$ ,  $H/\Delta H$  で表わした。また時間  $t$  については、タン水消失時を  $t = 0$  として  $T (T = D/\ell^2 \cdot t)$  で表わした。

ただし、 $k$  は土壌の透水係数、 $D$  は拡散係数であり、 $\Delta H$  は  $t = 0$  におけ

る地表面と暗キヨの間のポテンシャル差である。

## 2. 実験結果とその検討

### (1) 非定常暗キヨ排水の一般的性質

まず、非定常暗キヨ排水に関する一般的な特徴を明らかにするために、暗キヨ間隔  $S$  が 1.25 m、不透層の深さ  $\ell$  が 1.25 m、暗キヨ深さ  $d$  が 1 m、暗キヨ半径  $r$  が 2.5 cm の場合の地表面タン水落水後の暗キヨ排水

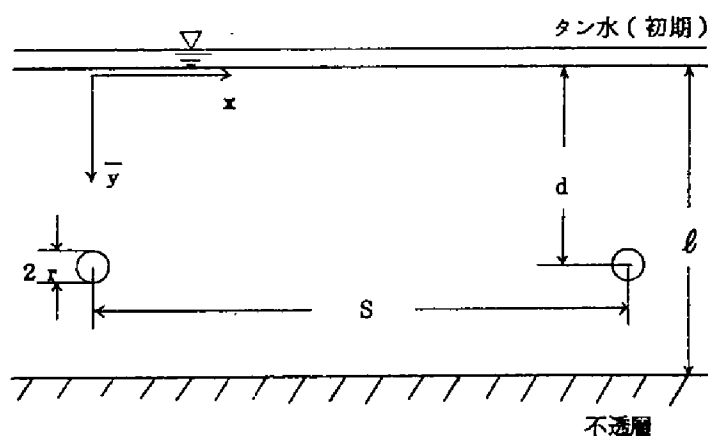


Fig. 2 - 11 均質土壌における非定常暗キヨ排水実験の記号図

量  $Q/k \Delta H$  および地表面におけるポテンシャル  $H/\Delta H$  の測定結果を示すと Fig. 2 - 12, Fig. 2 - 13 のとおりである。

Fig. 2 - 12 によると、 $Q/k \Delta H$  は最初は急激な減少を示しているがその後は次第に片対数紙上である直線に漸近するように減少していることがわかる。

また、Fig. 2 - 13 は、Fig. 2 - 11 に示してあるように暗キヨ直上

から地表面に沿って  $x$  軸をとり、暗キヨからのいろいろな距離  $x/\ell$  におけるポテンシャル  $H/\Delta H$  の変化を示したものである。

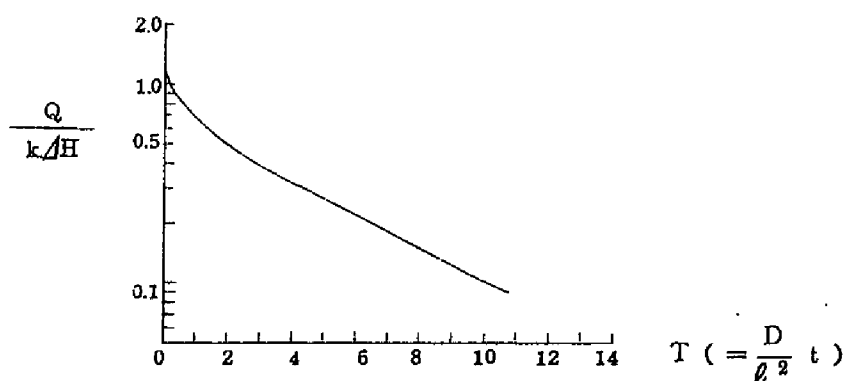


Fig. 2-12 暗キヨ排水量の時間的变化

これによると、タン水消失直後は暗キヨに近い所ほど急激な減少を示しており、暗キヨから離れるに従って排水が遅くなっていることがわかる。

しかしある時間を経過すると (Fig. 2-13 ではほぼ  $T=2$ )、暗キヨからの距離に関係なく、全体が一様に片対数紙上で等しいコウ配をもって直線的に減少するようになる。しかも、その直線のコウ配は  $Q/k\Delta H$  の場合と等しい値を示している。

ここでとくに暗キヨ間中央におけるポテンシャルの変化に注目すると、その直線部分はつぎのような簡単な指数関数で近似できることがわかる。

$$\frac{H}{\Delta H} = \frac{4}{\pi} \exp(-\alpha T) \quad (2-22)$$

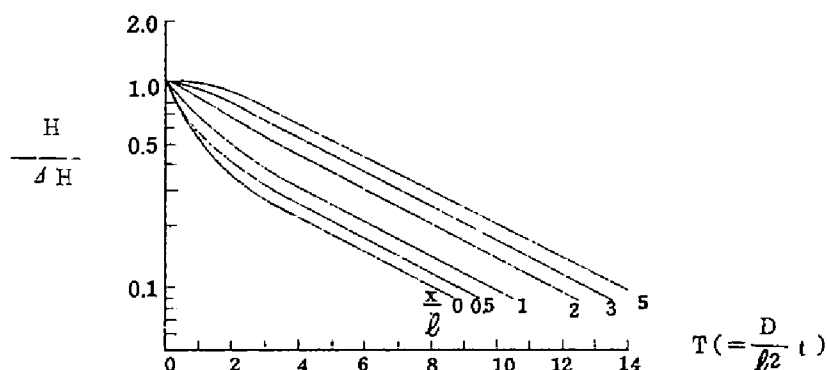


Fig. 2 - 13 地表面におけるポテンシャルの  
時間的变化

あるいは、 $T = D/\ell^2 \cdot t$  であるから

$$\frac{H}{\Delta H} = \frac{4}{\pi} \exp\left(-\frac{\alpha D}{\ell^2} t\right) \quad (2-23)$$

ただし、 $\alpha$ は暗キヨの間隔、深さ、半径および不透層の深さ等の境界条件のみによって定まる係数で、土壌の性質には関係しない値をとる。

以上の実験結果は、地表面タン水が消失して地下水面が地表面と一致した時を  $t = 0$  として得られたものである。

すなわち、初期条件としての地下水面が水平な場合における結果であるが、Fig. 2 - 13 のデータから類推すれば、初期条件としての地下水面が水平でなく、いわゆるカマボコ型の地下水面を考えた場合には、最初から全体が一様に排水されると考えられる。

すなわち、この場合には、 $t = 0$  においてすでに暗キヨ間中央と暗キヨ直

上との間にポテンシャル差が生じているわけであり、暗キヨ間中央においても Fig. 2 - 13 にみられるような排水の遅れは生じないものと考えられる。丸山<sup>28)</sup>によれば、暗キヨ間中央における地下水面は  $t = 0$  から直ちに指数関数的に低下しはじめることが確かめられている。

したがってこのような場合には、(2-23)式の右辺における係数  $4/\pi$  がなくなり、次式で表わされることになる。

$$\frac{H}{\Delta H} = \exp\left(-\frac{\alpha D}{\ell^2} t\right) \quad (2-24)$$

一般に大型機械の導入を目的とした水田の暗キヨ排水において、その効果を論ずる場合には、地表面付近における含水量や地耐力の変化が問題となる場合が多く、この点からみれば地下水面の深さよりも地表面におけるポテンシャルの変化で判定する方が合理的であると考えられる。

ところが、地表面における含水量や地耐力は地下水面の深さと密接な関係を有するものであり、また実際に測定する場合にも、地下水パイプによって地下水面の変動を観測する方が実際的かつ簡便であり、これまでもこの方法が多く採用されている。

実験の結果によると、暗キヨ間中央においては深さ方向にはポテンシャルの変化はあまりみられず、ほとんど同じ値を示していた。

したがって、土壌面蒸発による影響を考慮しなければ、ここで測定した地表面におけるポテンシャルを圧力 0 なる地下水面の変化として考えても実際には支障はないと考えられ、(2-23)式も暗キヨの高さを基準として測った地下水面の変動を表わすものと考えてよいと思われる。

## (2) 暗キヨ間隔について

つぎに、暗キヨの間隔、半径、深さ等が非定常排水に及ぼす影響について検討を加えることにする。

まず、暗キヨの深さ  $d$  および暗キヨ半径  $r$  を一定にして、暗キヨ間隔



Sをいろいろに変化させて実験を行なった場合の暗キ ≡ 排水量  $Q/k \Delta H$  の測定結果の一例を示すと Fig. 2-14 のとおりである。これによると、前述したように  $Q/k \Delta H$  はタン水消失直後にいずれも急激な減少を示しているが、その後は次第に片対数紙上である直線に漸近するように減少している。

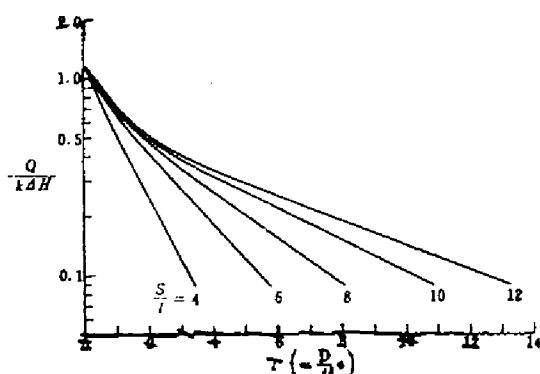


Fig. 2-14 暗キ ≡ 排水量と暗キ ≡ 間隔  
の関係 ( $\ell=125\text{m}$   $d=1\text{m}$   $r=25\text{cm}$ )

また、地表面におけるポテンシャルについては、排水が最も遅れる暗キ ≡ 間中央の値が問題となるのであるから、暗キ ≡ 間中央のポテンシャルの変化のみを考えることとし、 $H/\Delta H$  で表わしたのが Fig. 2-15 である。 $H/\Delta H$  に関しても同様で、最初は排水にやゝ遅れがみられるが、ある時間経過後は片対紙上で直線的に、すなわち指数関数的に減少していることがわかる。しかも、その直線部分の勾配はすべて  $Q/k \Delta H$  の場合と等しい値を示しており、近似的に (2-23) 式で表わすことができる。その場合の係数  $\alpha$  の値は Table 2-1 に示すとおりである。

係数  $\alpha$  は暗キ ≡ 間隔  $S$  が増大するにつれて次第に小さな値をとるが、これに関してはいくつかの暗キ ≡ 排水理論と比較しながら、後に考察を加えることにする。

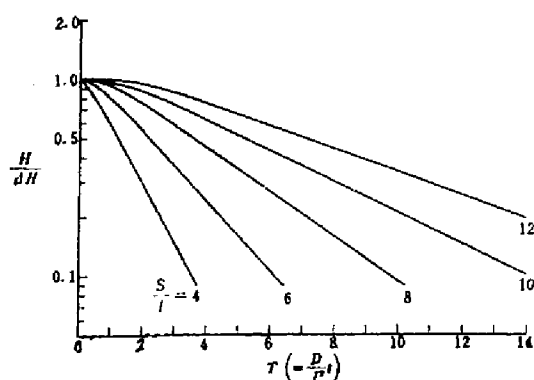


Fig. 2 - 15 暗キ<sub>3</sub>間中央におけるポテンシャル  
と暗キ<sub>3</sub>間隔の関係  
( $\ell = 1.25 \text{ m}$ ,  $d = 1 \text{ m}$ ,  $r = 2.5 \text{ cm}$ )

Table 2 - 1 係数  $\alpha$  の値と暗キ<sub>3</sub>間隔の関係  
( $r = 2.5 \text{ cm}$ )

$\ell (\text{m})$	$d (\text{m})$	$S \quad (\text{m})$				
		5.0	7.5	10.0	12.5	15.0
1.25	1.00	0.73	0.42	0.27	0.19	0.14
	0.75	1.09	0.60	0.39	0.26	0.21
5.00	1.00	13.01	8.28	5.55	4.15	3.39
	0.75	17.19	10.47	7.31	5.29	4.19

(3) 暗キ<sub>3</sub>半径について

つぎに、暗キ<sub>3</sub>半径  $r$  を変化させた場合の実験結果の一例は Fig. 2 - 16, Fig. 2 - 17 に示すとおりである。

これによると、 $r$  を大きくするほど排水が促進されることがわかる。したがって、暗キ<sub>3</sub>を砂のような透水性のよい材料でおおうことは有効な

方法であると考えられるが、暗キヨ間隔の影響に比べればその効果はそれほど大きなものではない。

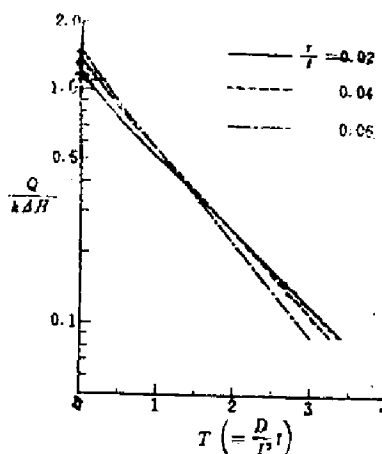


Fig. 2-16 暗キヨ排水量と暗キヨ半径の関係  
( $\ell = 1.25 \text{ m}$ ,  $d = 1 \text{ m}$ ,  $S = 5 \text{ m}$ )

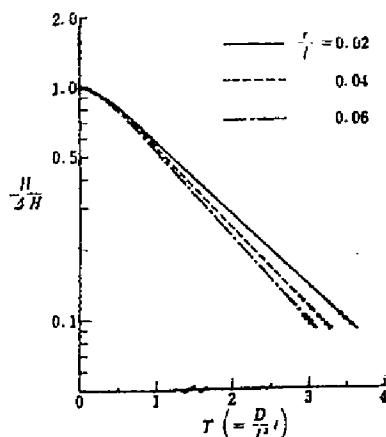


Fig. 2-17 暗キヨ間中央におけるポテンシャルと暗キヨ半径の関係  
( $\ell = 1.25 \text{ m}$ ,  $d = 1 \text{ m}$ ,  $S = 5 \text{ m}$ )

#### (4) 暗キヨ深さについて

暗キヨの深さ  $d$  についてもいろいろに変化させて実験を行なったが、その結果を比較検討するために、暗キヨ管内では水は半分の深さまで流れていると考え、近似的に  $\Delta H = d$  と仮定することにする。

前述したように、暗キヨ間中央のポテンシャル  $H/\Delta H$  は事実上地下水面の変動と等しい変化をすると考えられるので、実験結果の比較にあたっては、次式によって  $H/\Delta H$  を地表面から測った地下水面の深さ  $\bar{y}$  に換算して表わした。

$$\bar{y} = \Delta H - H = d \left( 1 - \frac{H}{\Delta H} \right) \quad (2-25)$$

その結果は Fig. 2 - 18, Fig. 2 - 19 に示すとおりである。

これによると、 $\ell = 5 \text{ m}$  の場合 (Fig. 2 - 19) には不透層が十分に深く、不透層の存在が排水にはほとんど影響を与えないと考えられるが<sup>20)</sup>、この場合には、地下水面の降下速度は暗キヨ深さによってはあまり影響されず、排水の初期においてはほとんど等しい速度で降下していることがわかる。

$\ell = 1.25 \text{ m}$  の場合 (Fig. 2 - 18) には、 $d$  が深ければかえって排水が遅くなっている傾向がみられるが、これは不透層が比較的浅い所に存在することによって排水が制限されるためと考えられる。

このことから、暗キヨは必ずしも深く埋設する方がよいというものではなく、土性や土層状態によっては、他の条件が許すかぎりある程度浅く埋設する方が経済性の面からいっても有利であり、不透層が浅い場合にはとくに有効であると考えられる。

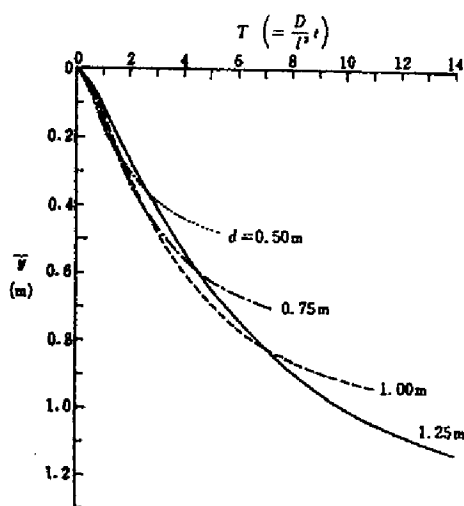


Fig. 2 - 18 暗キヨ間中央における地下水位と  
暗キヨ深さの関係  
( $\ell = 1.25 \text{ m}$ ,  $r = 2.5 \text{ cm}$ ,  $S = 10 \text{ m}$ )

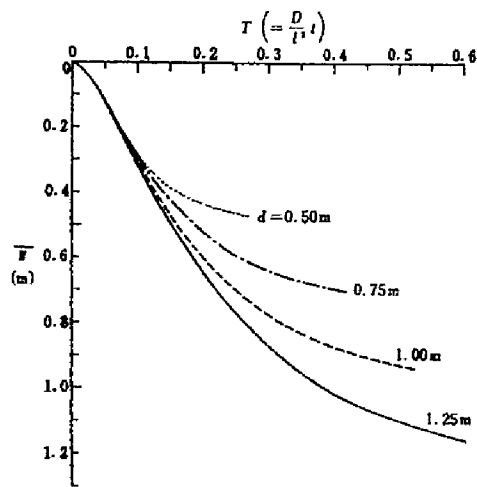


Fig. 2-19 暗キヨ間中央における地下水位と暗キヨ  
深さの関係  
( $\ell = 5\text{ m}$ ,  $r = 2.5\text{ cm}$ ,  $S = 10\text{ m}$ )

## Ⅱ. 成層土壌における非定常排水

### 1. 実験の目的および方法

成層土壌中に埋設された暗キヨの非定常排水に関する基礎的特性を明らかにし、あわせて暗キヨ埋めもどし部の非定常排水に及ぼす影響を確かめるために、Fig. 2-20 に示すような成層条件の場合について以下のような実験を行なった。

これらはすでに地表面タン水のある定常排水の問題として、第1編で検討を加えたものと同じである。

すなわち、暗キヨ間隔  $S$  を  $5\text{ m}$ 、不透層までの深さ  $\ell$  を  $1.25\text{ m}$ 、暗キヨ

半径  $r$  を  $2.5\text{ cm}$  とし、暗キヨの深さ  $d$  が  $1\text{ m}$  と  $0.75\text{ m}$  の2つの場合を考え、透水係数の比  $k_1/k_2$  をいろいろに変えて、地表面タン水落水後の暗キヨ排水量  $Q/k_1\Delta H$  および暗キヨ間中央の地表面におけるポテンシャル  $H/\Delta H$  の時間的变化を測定した。なお、上層および中層の厚さはそれぞれ  $d_1 = d_2 = 25\text{ cm}$  とし、暗キヨ埋めもどし部の幅  $b$  も  $25\text{ cm}$  とした。

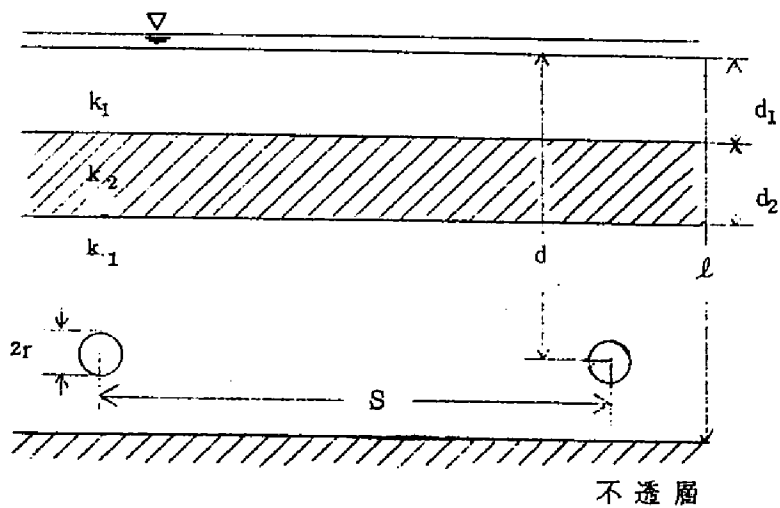
$k/D$  (アナログではコンデンサの容量  $C$ ) については簡単のために均質であると考え、 $k_1/k_2 = D_1/D_2$  と仮定したが、これを変数であると考えた場合にも同様にして実験を行なうことができる。

## 2. 実験結果とその検討

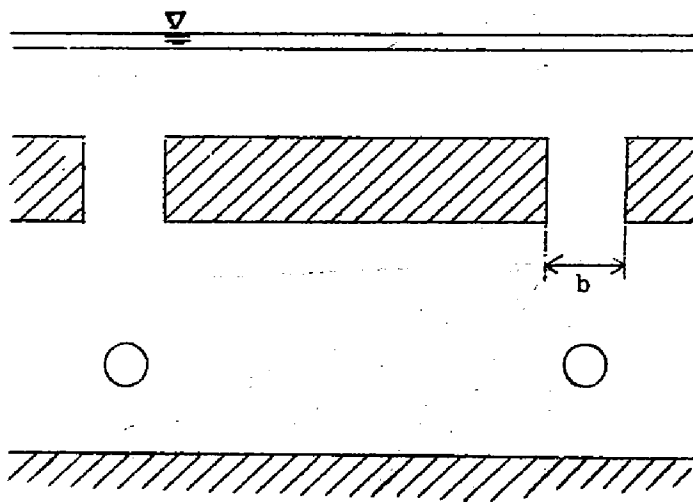
### (1) 暗キヨ埋めもどし部を考慮しない場合

実験結果を  $k_1/k_2$  のいろいろな値に対して図示すると Fig. 2 - 21, Fig. 2 - 22 のようになる。これによると暗キヨ埋めもどし部を考慮しない成層 (a) の場合も均質土壌の場合と同様に、 $H/\Delta H$  は指数関数的に減少しており、(2-23) 式の形で表わすことができる。この場合の係数  $\alpha$  の値は Table 2 - 2 に示されているように、 $k_1/k_2$  が大きくなるほど  $\alpha$  は極端に小さくなる。

すなわち、耕盤のように透水性の小さい層が発達している場合には、それによって排水が大きく影響されることを示している。



成 層 (a)



成 層 (b)

Fig.2 - 20 成層条件と記号図

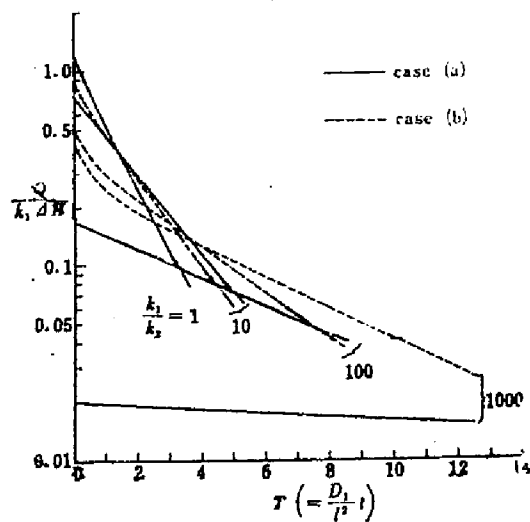


Fig. 2 - 21 暗キ≡排水量と  $k_1/k_2$  の関係

(  $d = 1 \text{ m}$  )

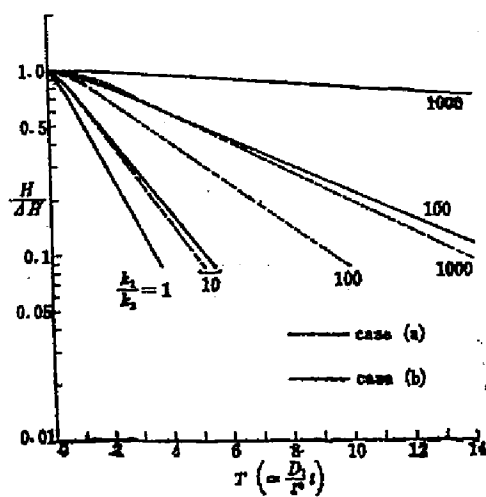


Fig. 2 - 22 暗キ≡間中央におけるポテンシャル

と  $k_1/k_2$  の関係 (  $d = 1 \text{ m}$  )



Table 2 - 2 成層土壌における係数 $\alpha$ の値

$k_1 / k_2$		5	10	20	50	100	200	500	1000
$d = 1\text{m}$	成層(a)	0.59	0.48	0.38	0.24	0.16	0.10	0.04	0.02
	成層(b)	0.61	0.51	0.44	0.32	0.26	0.22	0.19	0.18
$d=0.75\text{m}$	成層(a)	0.83	0.68	0.53	0.33	0.22	0.13	0.05	0.03
	成層(b)	0.85	0.76	0.60	0.44	0.38	0.31	0.27	0.25

(2) 暗キ $\Rightarrow$ 埋めもどし部を考慮した場合

暗キ $\Rightarrow$ 埋めもどし部を考慮した成層(b)の場合の実験結果も Fig. 2-21, Fig. 2-22 に示してあるが、この場合も  $H/\Delta H$  は指数関数的に減少しており、(2-23)式で表わすことができる。

$Q/k_1 \Delta H$  については、落水直後は急激に減少しているが、これは暗キ $\Rightarrow$ 埋めもどし部の影響により、暗キ $\Rightarrow$ 直上部付近がまず早急に排水されるためであると考えられる。

その後は次第に指数関数的に減少しており、この場合においてもそのコウ配は常に  $H/\Delta H$  の場合と等しい値を示している。

係数 $\alpha$ の値は Table 2-2 に示してあるように、 $k_1/k_2$ が大きくなるにつれて小さくなっているが、成層(a)の場合とは異なって無限に小さくなることはない。すなわち、 $k$ がいくら小さくならっても埋めもどし部を通してある一定量の排水が行なわれることを示している。

(3) 暗キ $\Rightarrow$ 埋めもどし部の排水効果

地表面にタン水のある定常状態の場合には、暗キ $\Rightarrow$ 埋めもどし部に流れが集中し、その排水に及ぼす影響が大きいこと、したがって暗キ $\Rightarrow$ 埋めもどし部を透水性のよい材料で埋めもどすか、あるいは膨軟な状態のまま埋めもどすことにより、排水は非常によくなることが第 I 編で確か

められている。

このような暗キ $\equiv$ 埋めもどし部の排水効果が落水後の非定常排水の場合にも大きいことは以上の考察から明らかである。すなわち、落水後も成層( b )の場合には( a )の場合に比べて排水がかなり良好となることが期待されるわけであり、その程度は  $k_1/k_2$  が大なるほど顕著である。

## 第4章 非定常暗キヨ排水理論に関する考察<sup>33)</sup>

近年、非定常暗キヨ排水に関して多くの研究が行なわれるようになり、いくつかの暗キヨ間隔公式も発表されているが、これらはみな、それぞれにいろいろな仮定や近似に基づいたものであり、必ずしも一般的に適合しうるとはいえないようである。

したがって、それぞれの暗キヨ排水理論の特徴をよく理解し、その適合性について検討を加えることは暗キヨ排水の設計において重要な問題であると考えられる。

したがって第4章では、これらの暗キヨ排水理論の主なものについてその特徴を述べるとともに前章で述べた R-C Network による実験結果と比較しながら、その適合性について考察を加えることにする。

まず、非定常排水の条件に基づいた暗キヨ排水理論の主なものを、実験結果と比較するために、(2-23)式の形に書きなおして示すと下記のとおりである。ただし、 $k$  は土壌の透水係数、 $f$  は drainable porosity,  $y$  は暗キヨ間中央における地下水位、 $y_0$  は  $t=0$  における  $y$  の値であり、他の式中の記号は Fig. 2-23 に示すとおりである。

Glover の式<sup>5)</sup> ;

$$\frac{y}{y_0} = \frac{4}{\pi} \exp \left[ -\frac{k}{f} \cdot \frac{\pi^2 \bar{D}}{S^2} t \right] \quad (2-26)$$

ここで、 $\bar{D}$  は平均地下水流動深さで

$$\bar{D} = h + \frac{1}{2} y_0$$

Hammad の式<sup>10)</sup> ;

$\frac{h}{S} < \frac{1}{4}$  の場合

$$\frac{y}{y_0} = \exp \left[ -\frac{k}{f} \cdot \frac{2\pi}{S \ell n \frac{S^2}{2\pi^2 h r}} t \right]$$

$\frac{h}{S} > \frac{1}{4}$  の場合

$$\frac{y}{y_0} = \exp \left[ -\frac{k}{f} \cdot \frac{2\pi S}{S \ell n \frac{S}{\pi r}} t \right]$$

(2-27)

Kirkham の式<sup>11)</sup>;

$$\frac{y}{y_0} = \exp \left[ -\frac{k}{f} \cdot \frac{1}{SF(S/2, 0)} t \right]$$

(2-28)

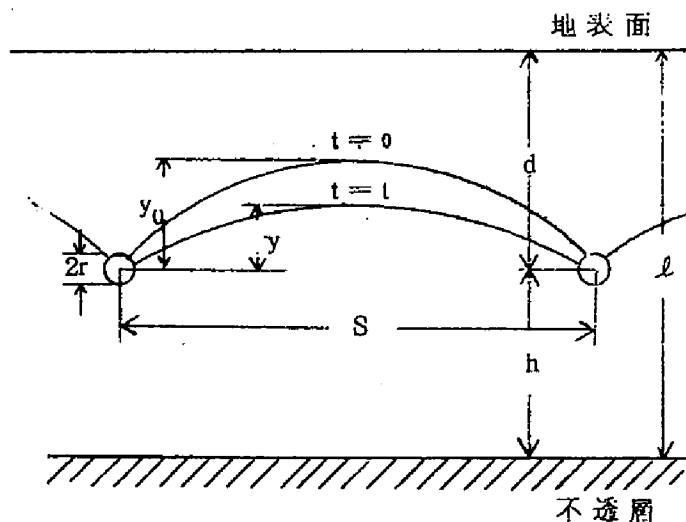


Fig. 2 - 23 暗キ排水理論の記号図

ここで、

$$F\left(\frac{S}{2}, 0\right) = \frac{1}{\pi} \left[ \ln \frac{1}{\sin(\pi r/s)} \right] \\ + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \left( \cos \frac{2m\pi r}{S} - \cos m\pi \right) \coth \left( \frac{2m\pi h}{S} - 1 \right)$$

関数  $F(S/2, 0)$  の値については、計算に便利なように計算図表が作られている。<sup>80)</sup>

以上の諸式においては、すべて(2-23)式と同様に、 $y/y_0$ は時間  $t$  の指数関数として表わされているが、Gloverの式(2-26)式以外の(2-27)、(2-28)式においては(2-23)式にみられるような右辺の係数  $4/\pi$  がかかっていない。これは前章で考察したように、初期条件としての地下水面が実験の場合とは異なって水平ではなく、降雨と平衡状態にあるいわゆるカマボコ型の地下水面を与えているためであると考えられる。したがって以後の実験結果との比較にあたっては、条件を同じくするために、すべて右辺に  $4/\pi$  をかけて考えることにする。

まず、実験を行なった暗キヨ間隔  $S$ 、暗キヨ深さ  $d$ 、不透層の深さ  $l$  のいろいろな値に対して、落水後暗キヨ間中央における地下水位を田面下 30 cm にまで下げるに要する時間を(2-26)、(2-27)、(2-28)の諸式を用いて求め、 $k/f \cdot t$  で表わすと、Table 2-3、Table 2-4 のようになる。

なお、表中の第⑩欄は、暗キヨ近傍の流れの収束による影響を考慮するために Glover の式(2-26)において  $h$  のかわりに Hooghoudt の equivalent depth  $d_e$  を用いて求めた値である。

実験結果については、前章で考察したように、 $H/\Delta H$  を事実上  $y/y_0$  に等しいと考えて(2-23)式から同様の計算を行ない、その結果を  $D_t$  で表わした。

$k/f \cdot t$  (m) および  $D_t$  (m<sup>2</sup>) は単位が異なるために直接に比較することは

できないが、 $k/f$  および  $D$  は土壌の性質のみに関係し、それぞれ定数と仮定されている値であるから、その変化の傾向を比較することによって式の妥当性を検討することができると考えられる。

Table 2-3, Table 2-4 から明らかなことは、使用する式によって  $k/f \cdot t$  の値にかなりの差異が生ずることである。

これは、それぞれの式の誘導過程において用いられたいろいろな仮定や近似の方法によるものと考えられる。

したがって、式の選定が重要な問題となるのであるが、これらの理論式を実際の暗キヨ排水の設計に用いる場合には、土壌の不均一性や成層性の問題、あるいは  $k$  ,  $f$  等の測定上の問題等のために  $k$  ,  $f$  をそれぞれ別個に求めて設計に用いることは必ずしも適切な方法ではなく、現地試験によって  $k/f$  の値を一括して求め、適当な公式を用いて暗キヨ間隔  $S$ 、暗キヨ深さ  $d$  等を決定するのが合理的であると考えられる。<sup>28)</sup> この場合には、 $k/f \cdot t$  の絶対値よりも、 $S$  ,  $d$  等の値に対する  $k/f \cdot t$  の変化の割合が問題となるのであるから、ここでは便宜上  $S = 10 \text{ m}$  の場合に対する  $k/f \cdot t$  の比を求めて図示し、実験結果と比較したのが Fig. 2-24 , Fig. 2-25 である。

Table 2-3 地下水位を 30 cm 下げるに要する  
時間の比較 ( $\ell = 1.25 \text{ m}$ )

d (m) S (m)	$\frac{k}{f} \cdot t \quad (\text{m})$								実験値 $Dt \text{ (m}^2\text{)}$	
	① Glover の式		② Glover の式 ( $U_0$ )		③ Hantush の式		④ Kirkham の式		1.00	0.75
	1.00	0.75	1.00	0.75	1.00	0.75	1.00	0.75		
5.0	2.02	2.18	2.09	2.62	2.53	2.77	8.23	6.96	1.34	1.07
7.5	4.55	4.90	4.66	5.60	4.37	4.88	18.70	13.55	2.26	1.94
10.0	8.08	8.71	8.24	9.66	6.38	7.20	31.41	22.58	3.54	3.05
12.5	12.63	13.62	12.82	14.82	8.51	9.66	46.38	33.87	5.11	4.56
15.0	18.19	19.61	18.41	21.05	10.73	12.25	65.82	48.90	6.93	6.09

Table 2-4 地下水位を30 cm下げるに要する  
時間の比較 ( $\ell = 5 \text{ m}$ )

S (m)	d (m)	$\frac{k}{f} \quad t \quad (\text{m})$								実験値 Dt (m <sup>2</sup> )	
		① Glover の式		② Glover の式 ( $d_e$ )		③ Hammad の式		④ Kirkham の式		1.00	0.75
		1.00	0.75	1.00	0.75	1.00	0.75	1.00	0.75		
	5.0	0.34	0.41	1.56	2.25	1.98	2.49	4.07	5.12	1.15	1.09
	7.5	0.76	0.93	2.97	4.20	3.26	4.10	6.51	8.18	1.81	1.80
	10.0	1.35	1.65	4.62	6.43	4.62	5.81	9.25	11.63	2.70	2.57
	12.5	2.11	2.58	6.45	8.87	6.04	7.59	12.21	15.35	3.60	3.55
	15.0	3.03	3.71	8.42	11.46	7.50	9.44	15.26	19.19	4.58	4.49

以下に、これらの図、表を参照しながら前述の各理論式の比較検討を進める、ことにする。

Glover の式 (2-26) は、Dupuit - Forchheimer の水平流の仮定を用い、さらに地下水流動深さ  $\bar{D}$  を一定と考えて、基礎式を線型化して導かれたもので、この式の適合性についてはいろいろと検討が行なわれている。その結果、 $h/S$  のみならず  $y_0/h$  の値も十分に小さくなければ適合しがたいと考えられる。<sup>8) 31)</sup>

$h$  が  $S$  に比べて大きい場合には、暗キ  $\approx$  近傍の流れの収束による影響が大きくなるので Dupuit - Forchheimer の仮定が成り立たなくなってくるが、この流れの収束による影響を考慮に入れるために、Glover の式において  $h$  のかわりに equivalent depth  $d_e$  を用いれば現地試験の結果とよく一致することが報告されている。<sup>12) 13) 14)</sup> ここでも、Fig. 2-25 に示されているように、不透層が比較的深い場合 ( $\ell = 5 \text{ m}$ ) には実験結果とかなりよく一致していることがわかる。

Hammad の式は、ポテンシャル理論による定常排水についての式を時間に関

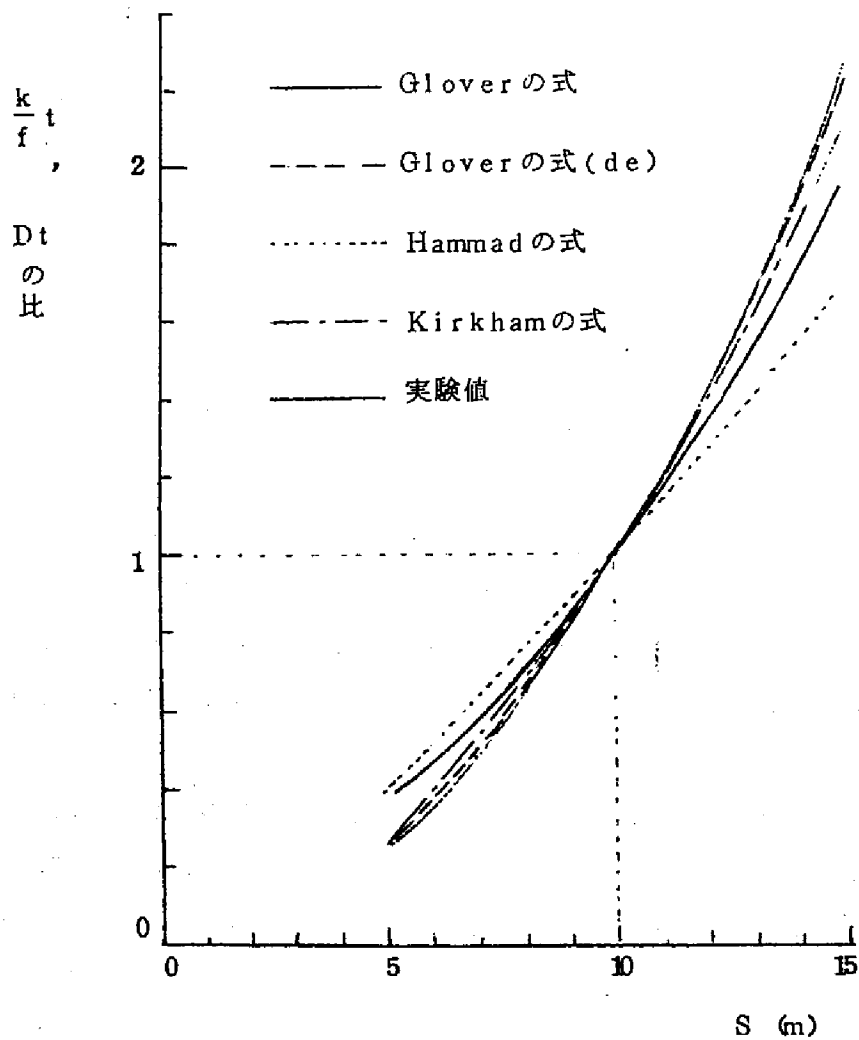


Fig. 2 - 24  $k/f \cdot t, Dt$  の変化の比較

( $\ell=1.25\text{m}$ ,  $d=1\text{m}$ )



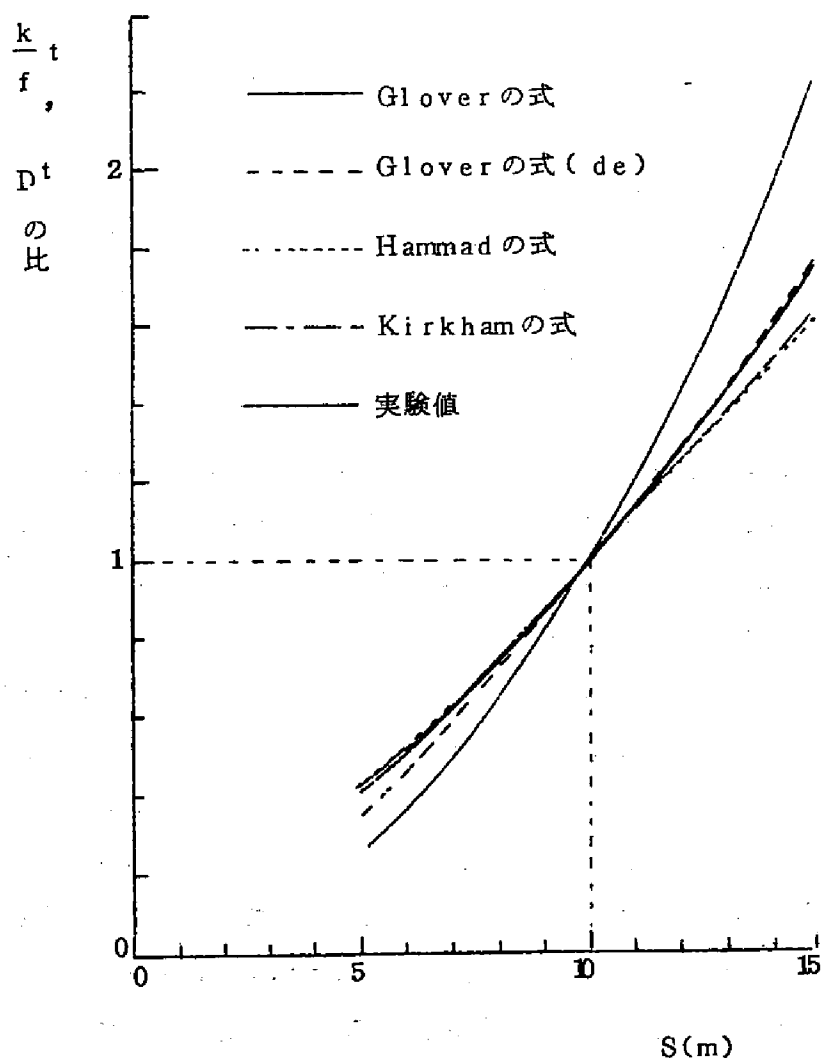


Fig. 2 - 25  $k/f \cdot t, D_t$  の変化の比較

( $\ell = 5\text{m}, d = 0.75\text{m}$ )

して積分して求められたものであるが、ここでも  $y_0$  は  $S$  に比べて十分に小さいと仮定されている。また積分の方法にも問題が残されており、実験結果とはあまり一致していないようである。

Kirkham の式は、暗キヨより上の部分をレキでおきかえて流れの抵抗を無視し、かつ流線を固定して導かれたものであるから、この場合にも  $y_0$  が  $S, h$  に比べて十分に小さくなければ適合しがたいと考えられる。

Table 2-3, Table 2-4 において、Kirkham 式による  $k/f \cdot t$  の値が他の式に比べて大きくなっており、不透層が浅い場合 ( $\ell = 1.25 \text{ m}$ ) にとくに著るしいのはこの理由によるものと考えられる。

しかし、 $k/f \cdot t$  の比の変化の傾向は実験値とかなり一致しているようである。

以上のように、これらの暗キヨ排水理論においては、 $y_0$  が  $S, h$  に対して十分に小さいものと考えられているために、ここで取り扱った落水後の非定常排水のように  $y_0$  がかなり大きい場合には、これらの理論の適用にはいろいろと検討すべき問題が残されている。

Brooks<sup>7)</sup>, van Schilfgaard<sup>8)</sup>, Moody<sup>9)</sup> らは、 $y_0$  が  $h$  に比べて十分に小さくない場合には Glover 式において  $D = \text{const.}$  と仮定することは不合理であるとして基礎式の線型化を行わず、解析的方法あるいは relaxation によって解を求めている。しかしながら、その結果はいずれも Glover 式に比べると同様に、 $k/f \cdot t$  は  $S$  の二乗に比例して変化しており、実験結果とは一致しない。これはすなわち、 $y_0$  が大きい場合には Dupuit - Forchheimer の仮定そのものにも問題があること、および毛管帯内の流れを考慮していないなどの理由によるものであろう。

また Table 2-3, Table 2-4 によれば、前述の暗キヨ排水理論を用いると、すべて  $d$  を深くする方が  $k/f \cdot t$  の値が小さくなり、地下水面の低下が早くなることになって、実験結果と一致しなくなるが、これは  $f = \text{const.}$  の仮定を用いているためと考えられる。

このように、これらの暗キヨ排水理論にはそれぞれに問題点があり、一般的に適用しうるものは得られていないが、以上に述べたことから総合的に考察すると、暗キヨ深さ  $d$  に対して不透層の深さ  $\ell$  が比較的深い場合には、Glover の式において  $h$  のかわりに  $d_e$  を用いる方法が比較的簡単で、妥当な方法であると考えられる。反対に  $\ell$  が比較的浅く、 $h$  が  $y_0$  に対して大きくない場合にはいろいろと問題があつてさらに詳細な研究が必要であるが、この場合には不透層の存在が暗キヨ排水量にかなりの影響を与えることになるので、<sup>29)</sup> <sup>34)</sup> 前述したようにむしろ暗キヨをやや浅く埋設するようにした方が有効であると考えられる。このような非定常排水における不透層の深さの影響あるいは Glover の式の適用限界等については、今後さらに詳細な研究が必要である。

## 第5章 総 括

第2編においてはまず、非定常排水の問題を解析するにあたってのいくつかの問題点について、従来の研究成果をもとにして考察を加えた。その結果、地下水面を流れの境界面としてそれより下の部分の流れのみを考え、さらに、drainable porosity  $f$  を一定と仮定している従来の解析法よりも、地下水面より上の毛管帯内の流れをも考慮に入れて拡散方程式を適用する方が、実情に則した合理的な方法であると考え、それを解く手段として R-C Network を試作した。

そしてこれを用いて、地表面タン水落水後の非定常暗キヨ排水の基礎的な問題についていろいろな実験を行なった。その結果、暗キヨ排水量、地表面におけるポテンシャルとも片対数紙上ではほぼ直線的に減少しており、しかもその直線のコウ配はいずれも等しい値を示していることが明らかになった。

また、とくに暗キヨ間中央におけるポテンシャルは(2-23)式のような簡単な指数関数で表わされることがわかった。

この暗キヨ間中央におけるポテンシャル  $H/\Delta H$  は、事実上暗キヨ間中央における地下水位  $y/y_0$  に等しいと考えても支障はないものと思われる。

つぎに、 $H/\Delta H$  の減少の割合、すなわち地下水位の低下速度は、排水の初期においては暗キヨの深さ  $d$  にはほとんど影響されないことが明らかになった。したがって、他の条件が許すかぎり暗キヨをやや浅く埋設する方が経済性の面からみても有利であり、不透層が比較的浅い場合にはとくに有効であると考えられる。

つぎに、成層土壌の場合について実験を行なった結果では、定常状態の場合と同様に非定常の場合においても、暗キヨ埋めもどし部の排水に及ぼす影響が大きいことが明らかになった。

最後に、これまでに発表されているいくつかの暗キヨ排水理論について、以

上の実験結果をもとにして比較検討を行なった結果、暗キヨがとくに不透層の近くになれば、equivalent depth  $d_e$ を用いたGloverの式が比較的よく適合することが確かめられた。なお、ここでは実験の都合上、暗キヨ間隔 $S$ が15 mまでの場合しか取り扱っていないが、 $S$ がさらに大きくなれば、Dupuit - Forchheimerの仮定も合理性を増すと考えられるので、Gloverの式はさらによく適合しうるものと思われる。しかしながら、この式は $y_0$ が $h$ に比べて十分に小さいと考えて導かれたものであるから、不透層が比較的浅い場合には式の取り扱いには十分注意する必要がある。

以上の考察は、暗キヨ間隔 $S$ のみに関することであって、暗キヨ深さ $d$ については実験結果と一致していない。これは $f = \text{const.}$ の仮定を用いているため、と考えられるが、 $f$ は一定ではなく、地下水面の深さおよび時間の関数として変化するものであるといわれている。したがって、Gloverの式における $k/f$ の値も一定ではなく、 $d$ によっても変化すると考えられるので、 $d$ の異なる場合へのGloverの式の適用については十分注意しなければならない。

この論文は、合理的な暗キヨ排水の設計に資することを目的として、暗キヨ排水の基礎的な事項について、電気アナログの方法を用いて理論的、実験的に研究を行なった結果をとりまとめたものである。

とくに成層土壌中における暗キヨ排水の問題や暗キヨ埋めもどし部の影響等について詳細な検討を加えた結果、いくつかの問題点を明らかにすることができた。

しかしながら以上の研究は、暗キヨへの浸透流が完全なポテンシャル流であり、流れはDarcy法則に従うと考える解析を行なったものである。もちろん実際の水田においては必ずしもこのように簡単なものではなく、複雑な土壌構造をもち、キ裂やその他の大間ゲキが存在している場合も多いが、このような場合にはキ裂や封入空気等の影響を含めた透水係数を現地測定によって求め、それを設計に用いるようにすればよい。なおこの場合、暗キヨ埋設後の埋めもどし部の安定、土壌の乾燥に伴うキ裂の発達等によって透水係数が変化するので、暗キヨ排水の設計にあたっては、このような透水係数の変化をも考慮に入れることが必要であるが、この問題は多くの因子がからみあって非常に複雑であり、今後の研究にまたなければならない。

また成層状態によっては負圧を呈し、不飽和状態となることも考えられる。負圧状態でも閉鎖浸透をしている場合にはDarcy法則がそのまま成り立つことが確かめられているが、開放浸透の場合にはさらに複雑な様相を呈するものと思われる。

このような問題についてはさらに詳細な研究が必要であり、今後現地試験等を行なって明らかにしたいと考えている。

## 参 考 文 献

### 第 1 編

- 1) Childs, E.C.(1943); The water table, equipotentials, and streamlines in drained land, Soil Sci., 56, 317-330
- 2) Childs, E.C.(1945); The water table, equipotentials, and streamlines in drained land II, Soil Sci., 59, 313-327
- 3) Childs, E.C.(1945); The water table, equipotentials, and streamlines in drained land III, Soil Sci., 59, 405-415
- 4) Aronovici, V.S. and W.W. Donnan(1946); Soil-permeability as a criterion for drainage-design, Trans. Amer. Geophys. Uni., 27, 95-101
- 5) Luthin, J.N.(1957); Drainage of agricultural lands, Amer. Soc. Agron., Madison, Wisconsin, 79-286
- 6) Luthin, J.N.(1965); Drainage engineering, John Wiley & Sons Inc., New York, 149-173
- 7) Van Schilfgaarde, J., D. Kirkham and R.K. Frevert(1956); Physical and mathematical theories of tile and ditch drainage and their usefulness, Res. Bull. 436 Iowa Agric. Expt. Sta., Iowa, 667-700
- 8) Kirkham, D.(1958); Seepage of steady rainfall through soil into drains, Trans. Amer. Geophys. Uni., 39, 892-908

- 9) Toksöz, S. and D. Kirkham(1961); Graphycal solution and interpretation of a new drain spacing formula, J Geophys. Res., 66, 509-516
- 10) Talsma, T. and H.C. Haskew(1959); Investigation of water-table response to tile drains in comparison with theory, J. Geophys. Res., 64, 1933-1944
- 11) 丸山利輔(1965); 地下排水に伴う水田水理機構, 農土試報告, 3, 1-43
- 12) Wesseling, J.(1964); A comparison of the steady state drain spacing formulas of Hooghoudt and Kirkham in connection with design practice, J. Hydrology, 2,25-32
- 13) Hammad, H.Y.(1962); Depth and spacing of tile drain systems, Proc. Amer. Soc. Civil Eng., 88(IR 1), 15-34
- 14) List, E.J.(1964); The steady flow of precipitation to an infinite series of tile drains, J. Geophys. Res., 69, 3371-3381
- 15) Dagan, G.(1964); Spacing of drains by an approximate method, Proc. Amer. Soc. Civil Eng., 90(IR 1), 41-66
- 16) Dagan, G.(1965); Steady drainage of a two-layered soil, Proc. Amer. Soc. Civil Eng., 91(IR 3), 51-64
- 17) Kirkham, D.(1966); Steady-state theories for drainage, Proc. Amer. Soc. Civil Eng., 92(IR 1), 19-39



- 18) Childs, E.C.(1959); A treatment of the capillary fringe in the theory of drainage, J. Soil Sci., 10, 83-100
- 19) Childs, E.C.(1960); A treatment of the capillary fringe in the theory of drainage II., J. Soil Sci., 11, 293-304
- 20) Bouwer, H.(1959); Theoretical aspects of flow above the water table in tile drainage of shallow homogeneous soils, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 23, 260-263
- 21) Kirkham, D.(1949); Flow of ponded water into drain tubes in soil overlying an impervious layer, Trans. Amer. Geophys. Uni., 30, 369-385
- 22) Kirkham, D.(1951); Seepage into drain tubes in stratified soil, Trans. Amer. Geophys. Uni., 32, 422-442
- 23) Luthin, J.N.(1953); An electrical resistance network solving drainage problems, Soil Sci., 75, 259-274
- 24) Luthin, J.N. and R.E. Gaskell(1950); Numerical solution for tile drainage of layered soils, Trans. Amer. Geophys. Uni., 31, 595-602
- 25) Evans, D.D. and G. Ashcroft(1961); Tile drainage for layered soil, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 25, 142-145
- 26) Fukuda, H.(1964); Subdrainage in heavy soil, theoretical considerations, Soil Sci., 97, 281-285

- 27) 多田 敦他 (1967); 粘土質の水田の地耐力に関する研究Ⅱ,  
農土論集, 21, 29-35
- 28) Todd, D.K.(1959); Ground water hydrology, John Wiley &  
Sons Inc., New York, 307-326
- 29) De Pakh, D.C.(1947); A resistor network for the approximate  
solution of the Laplace equation, Review Sci. Instr., 18,  
798-799
- 30) Liebmann, G.(1950); Solution of partial differential  
equations with a resistance network analogue, British J.  
Appl. Phys., 1, 92-103
- 31) 河原田礼次郎 (1962); 電気的相似法による浸透流の研究, 鹿児島  
大農報, 12, 1-106
- 32) Vimoke, et al.(1962); Improvements in construction and use  
of resistance networks for studying drainage problems,  
Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 26, 203-207
- 33) Muskat, M.(1946); The flow of homogeneous fluids through  
porous media, J.W. Edwards Inc., AnnArbor, Michigan,  
186-192
- 34) 富士岡義一, 高橋 強 (1967); 成層土壌における暗キヨ排水の  
基礎的研究Ⅰ, 農土論集, 21, 13-18
- 35) 富士岡義一, 高橋 強 (1967); 成層土壌における暗キヨ排水の  
基礎的研究Ⅱ, 農土論集, 21, 19-23

- 36) 富士岡義一, 高橋 強 ( 1 9 6 8 ) ; 成層土質における暗キヨ排水  
の基礎的研究Ⅲ, 農土論集, 23, 19-24

## 第 2 編

- 1) Childs, E.C.(1947); The water table, equipotentials, and streamlines in drained land V, The moving water table, Soil Sci., 63, 361-376
- 2) Childs, E.C. and T. O'Donnell(1951); The water table, equipotentials, and streamlines in drained land VI, The rising water table, Soil Sci., 71, 233-237
- 3) Kirkham, D. and R.E. Gaskell(1950); The falling water table in tile and ditch drainage, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 15, 37-42
- 4) Isherwood, J.D.(1959); Water-table recession in tile-drained land, J. Geophys. Res., 64, 795-804
- 5) Dumm, L.D.(1954); Drain spacing formula, Agric. Eng., 35, 726-730
- 6) Luthin, J.N.(1957); Drainage of agricultural lands, Amer. Soc. Agron., Madison, Wisconsin, 97-104
- 7) Brooks, R.H.(1961); Unsteady flow of ground water into drain tile, Proc. Amer. Soc. Civil Eng., 87(IR 2), 27-37

- 8) van Schilfgaarde, J.(1963); Design of tile drainage for falling water tables, Proc. Amer. Soc. Civil Eng., 89 (IR 2), 1-11, and 90(IR 3), 71-73
- 9) Moody, W.T.(1966); Nonlinear differential equation of drain spacing, Proc. Amer. Soc. Civil Eng., 92(IR 2), 1-9
- 10) Hammad, H.Y.(1962); Depth and spacing of tile drain systems, Proc. Amer. Soc. Civil Eng., 88(IR 1), 15-33
- 11) Kirkham, D.(1964); Physical artifices and formulas for approximating water table fall in tile-drained land, Soil Sci.Soc. Amer. Proc., 28, 585-590
- 12) Talsma, T. and H.C. Haskeu(1959); Investigation of water-table response to tile drains in comparison with theory, J. Geophys. Res., 64, 1933-1944
- 13) Dumm, L.D.(1968); Subsurface drainage by transient-flow theory, Proc. Amer. Soc. Civil Eng., 94(IR 4), 505-519
- 14) van Schilfgaarde, J.(1965); Transient design of drainage systems, Proc. Amer. Soc. Civil Eng., 91(IR 3), 9-21
- 15) Maasland, M.(1959); Water table fluctuations induced by intermittent recharge, J. Geophys. Res., 64, 549-559
- 16) Dagan, G.(1964); Linearized solution of unsteady deep flow toward an array of horizontal drains, J. Geophys. Res., 69, 3361-3369

- 17) Childs, E.C.(1960); The nonsteady state of the water table in drained land, J. Geophys. Res., 65, 780-782
- 18) Taylor, G.S.(1960); Drainable porosity evaluation from outflow measurements and its use in drawdown equation, Soil Sci., 90, 338-343
- 19) Luthin, J.N. and R.D. Miller(1953); pressure distribution in soil columns draining into the atmosphere, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 17, 329-333
- 20) Luthin, J.N. and R.V. Worstell(1957); The falling water table in tile drainage ——— A laboratory study, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 21, 580-584
- 21) Day, P.R. and J.N. Luthin(1956); A numerical solution of the differential equation of flow for a vertical drainage problem, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 20, 443-447
- 22) Remson, et al.(1965); Vertical drainage of an unsaturated Soil, Proc. Amer. Soc. Civil Eng., 91(HY 1), 55-74
- 23) Watson, K.K.(1967); Experimental and numerical study of column drainage, Proc. Amer. Soc. Civil Eng., 93(HY 2), 1-15
- 24) Jensen, M.E. and R.J. Hanks(1967); Non-steady state drainage from porous media, Proc. Amer. Soc. Civil Eng., 93(IR 3), 209-231

- 25) Gardner, W.R.(1962); Approximate solution of a non-steady-state drainage problem, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 26, 129-132
- 26) Fujioka, Y. and T. Kitamura(1964); Approximate solution of a vertical drainage problem, J. Geophys. Res., 69, 5249-5255
- 27) Walton, W.C. and T.A. Prickett(1962); Hydrogeologic electric analogue computers, Proc. Amer. Soc. Civil Eng., 89(HY 6), 67-91
- 28) 丸山利輔(1965); 地下排水に伴う水田水理機構, 農土試報告, 3, 1-43
- 29) Asseed, M. and D. Kirkham(1966); Depth of barrier and water table fall in a tile drainage model, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 30, 292-298
- 30) Taksöz, S. and D. Kirkham(1961); Graphical solution and interpretation of a new drain spacing formula, J. Geophys. Res., 66, 509-516
- 31) Maasland, D.E.L. and R.A. Shery(1967); Falling water table between tile drains, Proc. Amer. Soc. Civil Eng., 93(IR 2), 9-19
- 32) 高橋 強(1969); 非定常暗キ排水の基礎的研究 I, 農土論集, 30, 40-46

- 33) 高橋 強 (1969); 非定常暗キ ヌ 排水の基礎的研究Ⅱ, 般土論集,  
30, 47-54